



TITLE:

【部局史編 3】 第26章: 原子炉実験所

AUTHOR(S):

京都大学百年史編集委員会

CITATION:

京都大学百年史編集委員会. 【部局史編 3】 第26章: 原子炉実験所. 京都大学百年史: 部局史編; 3 1997: 420-477

ISSUE DATE:

1997-09-30

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/152954>

RIGHT:

第1節 総記

第1項 沿革と目的

1. 設置目的

京都大学原子炉実験所は、昭和38(1963)年4月1日京都大学附置研究所として設置された。

本実験所の中心施設である研究用原子炉の設置計画案が、京都大学工学研究所から文部省に提出されたのは、昭和30(1955)年のことである。

同年7月、日本学術会議で開催された「原子力に関するシンポジウム」において、関東および関西の大学に研究炉を1基ずつ設置する、ということに意見が一致し、文部省では慎重審議の結果、昭和31(1956)年8月京都大学に研究用原子炉1基を設置する案を科学技術庁あてに提出した。

ここにおいて、原子力委員会は京都大学側の計画等について説明を求め、その後、管理、運営形式、土地選定等に関して検討を加えた結果、「大学における原子炉は、基礎研究用とし、炉の所属、管理方式等は今後調整すること」として、昭和31年10月24日科学技術庁原子力局長から文部省大学学術局長へ通知した。またこれに先立って同年9月6日、原子力委員会は「原子力開発利用長期基本計画」を発表していたが、この基本計画においても「大学における基礎研究および教育のための原子炉はさしあたり関西方面に1基設置し、その後必要に応じて漸次考慮するものとする」としていたのである。

文部省では研究炉設置に関して10大学の学長に意見を求め、一方関係大

* 扉の写真は、KUR(左)およびKUCA(右)。

学、科学技術庁、日本学術会議関係者と協議の結果、京都大学に原子炉設置準備委員会を置くことになった。この委員会は、京都大学、大阪大学からそれぞれ4名、原子力局長、大学学術局長、日本原子力研究所副理事長をもって構成し、この委員会で改めて、原子炉設置に関する計画、原子炉の型、設置場所、管理運営の方法等を検討、立案することになった。その第1回会議が昭和31(1956)年11月30日文部省において開催され、当時原子力委員であった理学部教授湯川秀樹が委員長に選ばれた。したがって、研究用原子炉設置計画は漸く軌道にのったのである。

設置準備委員会は京都大学をはじめ、関西方面の各大学の専門家約150名を専門委員に委嘱し、立地調査、原子炉、ホットラボラトリ、建築施設、汚染対策、保健物理の各分科会を組織し、計画に当たった。文部省ではこれらの動きに基づいて、昭和32(1957)年度予算にこの原子炉の設置に必要な経費を計上するに至った。

この頃日本学術会議原子力問題委員会は、「関西研究用原子炉の設置計画をすすめるにあたっては、公開、自主、民主の3原則に添うことが望ましく、特に(1)全国研究者の共同利用施設として、その効果が十分あがるよう適切な体制をつくるべきであり、(2)その設置の段階においても、全国の専門研究者から意見を徴するなど、実質的に計画審議に参加できる機会を与えるべきである」と結論し、この旨、湯川設置準備委員長あて申し入れた。

なお日本学術会議は、その後においても関西研究用原子炉の建設が全国科学者の共同利用研究炉として推進されるよう、そのつど努力を続けたのである。

かかる努力が各方面にわたってなされつつあったのに反し、原爆の洗礼を受けた国民の痛手は深く、原子炉設置予定地の地元住民の根強い反対により、研究炉の敷地決定には5カ年の歳月を費やすことになったのである。

2. 難航した敷地問題

昭和32(1957)年1月準備委員会は研究炉の敷地場所として京都府下宇治、

第26章 原子炉実験所

舞鶴について検討した結果、宇治を候補地と定めた。ところが、宇治が大坂方面の水源地の上流にあることから、社会的な問題になり、淀川を水源とする市町村の猛反対となり、準備委員会の結束が乱れ、湯川はついに責任をとって委員長を辞任せざるを得なくなった。このような事態を收拾するためほかに候補地を求めなければならなくなった。

同年8月20日第5回準備委員会では、宇治案の放棄を決定するとともに大阪府高槻市阿武山付近を有力な候補地としたが、隣接の茨木市が全市をあげて反対運動を行い、吹田市もこれに同調するに至った。その理由は①設置場所が水源地であることは宇治の場合と同様であり、②原子炉の安全性について学者の意見が必ずしも一致しておらず、③安全性のための予算的措置の見通しが少ないなどの理由であった。

同年12月20日、大阪府原子力平和利用協議会は地元代表と協議の結果、原子炉および設置場所の安全性等について、日本学術会議の意見を求めることになった。

日本学術会議では昭和33(1958)年6月、原子力関係の委員会において検討の結果、原子炉の設置を強く要望するとともに、原子炉およびその安全性に関する資料を速やかに原子力委員会に提出すべきである旨回答を行った。

京都大学では「関西研究用原子炉設置計画資料」を作成し、同年7月11日原子力委員会に提出した。

原子力委員会では慎重な審査の結果、同年12月9日に至り、立地条件さえよければ、同原子炉の安全性は十分確保できると結論し、大阪府に対しても、設置について協力を依頼した。

このことにより、大阪府では関西研究炉の安全性については、一般の不安感除去し得たと思われたので、阿武山問題は未解決のまま昭和34(1959)年3月第3の候補地として大阪府下交野町星田地区を、同年12月には同じく四条畷町を4番目の候補地として発表した。

しかし、いずれの場所でも地元住民の反対運動が活発に行われた。このことは関西における原子力平和利用促進の障害になるので、産業界も積極的に

この問題に取り組み、また当時の中曽根康弘原子力委員長もこの研究炉設置のためには、しばしば関西方面を訪れ、問題解決に当たった。

かかる努力にもかかわらず、世界唯一の原爆被災国である国民の放射能に対する過大な恐怖心と、複雑な地方政治の利害関係とが重なり合い、その上原子炉の安全性以外の要素からの反感や、不信感などがからみ合っただけの反対運動の前には、いかんともできぬ状態であった。ここに至って、設置を推進する当事者の間では従来のやり方を改め、昭和35(1960)年4月11日、大阪府は大学研究用原子炉設置協議会を発足せしめた。

これは、後に大阪府条例による大阪府原子炉問題審議会(以下「府審議会」という)に移行したものであるが、宇治案以来一貫して反対運動を続けてきた組織の代表者も委員に含めて組織されたものであって、この協議会は大阪府から候補地の選定について一任され、府下22カ所の候補地を、民主的かつ科学的に選定した結果5地区を適地として確認し、京都大学に提示した。

京都大学ではその内から3地区について科学的な精密調査を実施し、総合的判断の結果、大阪府泉南郡熊取町朝代地区を最適地と定め、土地買収を開始した。協議会は敷地に隣接する泉佐野市に反対期成同盟が組織された関係もあって、正式に敷地決定を発表したのは昭和35年12月9日であり、5年越しに難航を続けた敷地問題はここに解決を見たのである。

3. 建設——原子炉実験所の創設

京都大学においては原子炉の建設のため、昭和33(1958)年9月に京都・大阪両大学のほか関西諸大学ならびに日本学術会議より推薦された委員で構成する関西研究用原子炉建設委員会(委員長工学部教授藤本武助)が組織され、以来原子炉ならびに関連施設に関する技術的計画を推進するなどの努力が続けられていたが、昭和36(1961)年9月4日京都大学から原子炉設置承認申請書が科学技術庁原子力局へ提出され、昭和37(1962)年3月15日に承認された。これに先立ち約32万㎡にわたる敷地の所有権移転登記は昭和36年3月31日に完了した。

第26章 原子炉実験所

昭和37年4月1日には、原子炉の建設に伴う業務を統一的に処理するため、京都大学に研究用原子炉建設本部(本部長教授木村毅一、副本部長教授丹羽義次)が設けられ、それまで京都大学工学研究所に所属していた原子炉の要員たるべき教官多数が、建設本部員として発令され、建設業務を促進することになった。

原子炉施設の建設工事は昭和36(1961)年12月1日起工式を挙げて以来、建設本部を中心とし、3カ年計画で進められ、敷地造成に着手するとともに、初年度の終わり(昭和37年3月末)には、事務棟、中央観測所、倉庫、浄水運転室、中央変電所等延べ約1,520㎡が、次年度には、原子炉棟およびホットラボラトリ、工作棟、下水処理運転室等延べ約4,560㎡が、最終年度には、研究棟、トレーサ棟、放射性廃棄物処理棟およびボイラー室、研究員宿泊所、中性子発生装置室、生物別棟、放射線野外監視所等延べ8,100㎡の各種建物ならびに付帯設備が完工した。すなわち昭和39(1964)年3月31日には、原子炉本体を除き、実験、研究に必要なすべての施設が竣工したのである。

原子炉本体については、昭和36年8月に予備契約、昭和37年3月には、米国インターニュクリア社と本契約をなし、その間教授柴田俊一、および助教岡本朴が米国に出張し、設計、仕様等について、スコーピングを行った。引き続き具体的作業が進められ順調に進捗した。

昭和39年6月25日17時55分、設置計画以来9年目にして、研究用原子炉(以下「KUR」または「1号炉」という)は待望の臨界実験に成功、さらに同年8月17日16時17分には定格出力1,000kWに到達した。かくして昭和39年12月24日には、政府より原子炉性能ならびに原子炉施設の検査合格の承認がなされた。

なお実験所創設に直接要した経費は総額27億943万3,000円であり、その内訳は施設費14億4,853万4,000円(敷地購入費9,012万8,000円を含む)、設備費11億8,928万3,000円、その他の経費7,161万6,000円であった。

参考までに昭和40(1965)年度経常費合計は約4億3,296万3,000円である。

工事最盛期の昭和38(1963)年4月1日には国立学校設置法の一部改正により、原子炉実験所は正式に京都大学に附置され、開所式は臨界直後の昭和39年7月6日に執り行われた。

実験所創設と同時に初代所長には教授木村毅一が就任した。

4. 高中性子束炉(2号炉)計画の発端から撤回まで

原子炉実験所の歴史で忘れられない2号炉計画の起こりは昭和42(1967)年にさかのぼる。当時わが国の中性子回折グループはその2年前臨界となったブルックヘブン国立研究所高中性子束炉 HFBR(米国、熱出力40MW)による中性子ビーム実験のめざましい研究成果に刺激されて、高中性子束炉の実現を希求することとなり、まず九州大学がこれに呼応して高中性子束炉の計画を策定した。実験所においてもこれに触発された関係研究者が高中性子束炉の模索を始めることとなった。中性子回折グループと実験所との接触が進むなかで、KURによる共同利用研究の実績を重ねた実験所の存在が次第に認められるようになった。昭和43(1968)年7月実験所はKURの熱出力5,000 kWへの出力上昇を成し遂げた。昭和44(1969)年には教授柴田俊一が委員長となって2号炉調査委員会を所内に設立し議論を進め、この頃には実験所で高中性子束炉を実現することが関係学界で了解されるようになった。「我が国の原子力研究将来計画」専門研究会(昭和45<1970>年設置)に集まった研究者の尽力と、日本学術会議原子力基礎研究連絡委員会(委員長名古屋大学教授伏見康治)での検討を経て、中性子ビーム実験の分野のみならず広範な学問分野の要求を充たす性能を持つ高中性子束炉を柱とする「我が国の大学関係原子力研究将来計画について」の勧告が昭和46(1971)年6月日本学術会議から出された。実験所においても所長岡村誠三の下、この勧告に盛り込まれた臨界集合体および高中性子束炉の実現を実験所の将来計画とすることを方針とし、そのための概算要求を提出するに至った。ただ当時の所員の多くはそれを、「学界からの付託」という観点の提起よりも、むしろ「実験所自身の将来計画」というとらえ方をしていたようである。計画の推進は昭和47

(1972)年4月岡村誠三の後を継いで柴田俊一が所長に就任し、同所長の下で計画が推進されることとなった。

KUCA(臨界集合体実験装置)については昭和47(1972)年度を起点とする2カ年計画で予算が認められた。昭和47年5月国に対して KUCA 増設の原子炉設置変更承認申請を提出し、同年8月24日付でこれが承認された。この KUCA は、型式の異なった3つの炉心が共通の駆動装置で運転できるもので、1つの炉心で実験している間に他の炉心では次の実験の準備ができるという装置の利用によって画期的な構造のものである。昭和48(1973)年5月には KUCA 建設についての府審議会の了解が得られ、同年6月に建設に着工した。そして、昭和49(1974)年3月30日に竣工、同年8月6日最初の炉心(C 架台)の臨界に成功した。以来 KUCA は研究、教育両面にわたりその使命を果たし続けている。

高中性子束炉(以下「KUHFR」または「2号炉」という)については、引き続き所長柴田俊一の主導により計画の推進が図られた。昭和49年所外の研究者も加えた高中性子束炉専門研究会を、また所内には10を超える数のワーキンググループを設置し、KUHFR 建設の準備を進めた。昭和50(1975)年5月には HFR 準備室を設置し専任の教官・技官を配置した。この年度に初めて KUHFR 調査費が予算化され、これと並行して部門の新設、振り替え増設、研究施設の新設が KUHFR を念頭に置いた形で始められた。しかし、当時の所員の中にはなお KUHFR が自分のものという実感に乏しいという受け取り方もあり、KUR による共同利用、実験研究が円滑に進むなかでは、所内に一定の充足感があり、将来計画として2号炉が必要不可欠という強い認識でまとまっていたわけではなかった。翌昭和51(1976)年度も引き続き2号炉調査費の予算を得て準備を進行し、同年8月には総長岡本道雄は大阪府知事、熊取町長、泉佐野市長および貝塚市長に KUHFR 建設計画への協力を要請した。同年10月1日国に対して高中性子束炉増設の原子炉設置変更承認申請を提出し、以後2年間、約60回に上る原子炉安全専門審査会第127部会の審査を経て、昭和53(1978)年10月2日 KUHFR 増設は承認された。一方、

大阪府においても昭和52(1977)年2月知事は府審議会に2号炉建設計画について諮問し、府審議会で地域整備と安全性確保の両面から検討することとなった。同年8月府審議会は安全性の確保について検討する専門委員会を設置した。翌昭和53(1978)年5月府審議会は専門委員会からのKUHFの安全性は確保されている旨の調査報告書を受理するなど、その審議を進めた。これと並行して、2号炉の建設についての地元住民との対話はやや遅れて同年12月に始められた。

時を同じくして実験所はいくつかの点で社会的に注目されるようになった。昭和51(1976)年12月に明らかにされた関西電力美浜発電所1号機の燃料棒破損事故調査のため、日本原子力研究所大洗研究所へ破損燃料棒を陸送するに当たって科学技術庁の要請に応じて本実験所は所有していた輸送用キャスクを関西電力に貸与した。また、昭和53(1978)年5月には四国電力伊方発電所1号機裁判の判決について本実験所のある教官のこれを至当とする論評が『朝日新聞』に掲載された。これらは、実験所が原子力発電の推進に加担するものとして、反対の立場に立つ者からの反発を招くこととなった。このため、2号炉計画についても昭和53年12月、先のキャスク貸与の際の抗議の主体となった原水爆禁止全面軍縮大阪府協議会(以下「軍縮協」という)より異議が出され、府審議会の要請と立ち会いの下で軍縮協との間で2号炉の安全性について意見交換会が開催された。論点となったのは、①KUHFの型式と性能についての問題点、②耐震設計用地震動の設定とこれに対する工学的設計の問題点、③敷地周辺の人口増加と安全性との関わり、であった。このうち②については経験則を拠り所とした当時の事情においては収束した結論を見出すのが困難であり、後々まで論点のままで残った。

昭和53(1978)年12月に始められた熊取町における町会議員、自治区区長、原子炉問題対策協議会委員に対する2号炉の説明会(以下「熊取町説明会」という)、また自治区ごとの説明会は急速に精力的に進められた。一方、府審議会は、知事に対する答申案取りまとめのため昭和54(1979)年2月末に会合を設定した。しかし、これに先立って開かれた3度目の熊取町説明会で、町

民に対して実験所および2号炉についての平易なパンフレットを作成配布せよとの意見が集約されたこともあって、この会合では地元住民の十分な理解が得られていないという理由で2号炉計画についての結論は保留となった。今から振り返ると、この時点以降、事態の進展がないままに2号炉計画を撤回するに至っている。実験所は熊取町説明会の意見を受け、パンフレット「京大原子炉——現状と当面の計画」を刊行するなど、地域の理解を得るための努力を重ねた。しかし同年3月、実験所の将来計画短期研究会で所長柴田俊一は、「KUHFＲについては地元との交渉を鋭意進めており後一步であるが、その一步は無限大であるかも知れない。」と述べている。

事実、その直後昭和54(1979)年3月28日には米国スリーマイル島原子力発電所2号機の事故が発生し、さらに同年4月13日には朝刊3紙が「実験所の排水が流れる小川の泥にコバルト60が含まれていたことが外部のある研究者によって指摘された。」と報じた、いわゆる「タレ流し」問題が発生するなど、2号炉計画は大きな打撃を受けることとなった。上記の諸問題については本学の教職員学生においても関心を示し抗議行動に出る向きもあり、昭和54年10月15日付の『京大広報』号外、「原子炉実験所をめぐる諸問題について」および昭和55(1980)年3月1日付『京大広報』192号において実験所の立場と見解を表明する機会が与えられた。

以後、昭和55(1980)年4月米国政府のKUHFＲ用高濃縮ウランの輸出許可(所定量が輸入され、後にKUR用として転用されることになった)などの動き、府審議会専門委員会によるKUHFＲ安全性の再確認(1つの契機として、昭和56<1981>年4月の日本原子力発電敦賀発電所の環境汚染事故があった)や府審議会会長による知事への答申素案の提示など、KUHFＲの設置に向けた多くの人々の尽力と、見かけ上の事態の動きにもかかわらず、地元熊取町の了承を得るに至らなかった。昭和55(1980)年4月に就任した所長林竹男、および昭和58(1983)年4月に就任した所長岡本朴はその当初、KUHFＲ建設に向けてその力を傾倒した。昭和58年7月京都大学原子炉利用者グループは、「2号炉計画実現への要望書」を実験所長あてに提出し、また、同年9月に

は総長沢田敏男が、大阪府知事および熊取町長を訪問し、2号炉計画の促進について要望している。結局、「一九七二(昭和四七)年建設が提案された高中性子束炉(通称2号炉)については町内に反対があり、建設に手をつけられないまま現在に至っています。」(熊取町『熊取の歴史』1986年11月、158頁)という表現に集約される事態が続いた。

2号炉建設が困難であることを見通し、これに代わるものを模索する動きは所内においては所長岡本朴の下で昭和59(1984)年頃から顕在化してきた。昭和62(1987)年1月府審議会において、岡本所長は研究炉計画の見直しの検討を始めている旨言明し、同年12月の府審議会においては新型研究炉計画第1次案について報告した。しかし、これも十分な条件整備がないまま、昭和63(1988)年3月の所員会議で所長は、「見直し炉を実験所の将来計画とはしない。」と言明するに至った。平成元(1989)年4月教授西原英晃が所長に就任し、平成2(1990)年7月末の学術審議会報告に盛り込まれた2号炉計画撤回の趣旨をうけた作業が進められ、同年10月評議会は2号炉計画撤回を了承した。総長西島安則は大阪府知事等に2号炉計画の撤回を正式に報告し、同年12月府審議会等はこれを了承した。国に対しても同年12月高中性子束炉増設計画撤回の原子炉設置変更承認申請が提出され、翌平成3(1991)年2月国の承認によって、約25年の歳月にわたった高中性子束炉建設計画は終焉した。

5. 1号炉(KUR)の整備と将来計画

平成元(1989)年6月に将来計画起案委員会(委員長教授前田豊)が所長の諮問機関として設置された。本委員会は2号炉計画の撤回とその後の実験所のあり方を実験所自身で考えようとするもので、いくつかの小委員会を設けて精力的に活動を開始した。その後、2号炉撤回やむなしの流れのなかで、平成2(1990)年3月に文部省学術審議会特定領域推進分科会原子力部会において、この問題の検討が開始された。そして、同年7月にはその結果が「大学における研究用原子炉の在り方について(報告)」としてまとめられ、総会に

第26章 原子炉実験所

報告された。この報告では、2号炉計画撤回後の対応として、1号炉(KUR)の取り扱いおよび実験所の組織の見直しについて言及し、京都大学の考え方も考慮し、3年以内に結論を出すとの考えが示された。これをうけて文部省より京都大学の考えをまとめるよう指示があり、京都大学では直ちに「京都大学原子炉実験所の在り方検討委員会」(委員長理学部教授小林農作)を設置し、検討を開始した。本委員会は実験所が共同利用研究所であるため、京都大学のみならず大阪大学をはじめとする他大学からの委員の参加をえて進められた。なお、この間に前述のように2号炉は平成2年12月に計画撤回の申請を国に提出、平成3(1991)年2月に承認された。そして平成3年9月、1号炉を整備し研究を進展させることを骨子とした検討結果が「京都大学原子炉実験所の在り方について」として総長に報告された。京都大学はこの報告に基づいてまとめたものを平成4(1992)年8月に「京都大学研究用原子炉(KUR)の整備等について」として文部省に提出した。

学術審議会原子力部会では、京都大学における検討の報告も考慮しながら審議を重ね、平成5(1993)年7月に「大学における研究用原子炉の在り方(報告)」をまとめ、総会において報告した。

この報告には、大学における研究用原子炉に関する一般的な問題とともに、KURの位置付けおよび役割、KURの今後の取り扱い、原子炉実験所の組織のあり方等が述べられている。

これらは原子炉実験所の今後の運営に関する極めて重要な問題であり、実験所では直ちに必要な委員会を設けて、大部門制への移行、KURの整備等の問題に取り組み、今後の活性化に向けて努力しているところである。

第2項 組 織

実験所の職員は以下に述べる研究部門、事務部、技術室(部)の各組織に属し、さらに多数の職員は安全のための組織にも属し活動が続けてきた。平成6(1994)年7月1日現在の職員の内訳を表26-1に示す。

表26-1 職 員 数 (平成6年7月1日現在)

| 教 授 | 助教授 | 講 師 | 助 手 | 小 計 | その他の職員 | 非常勤職員 | 合 計 |
|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-------|-----|
| 13 | 13 | 3 | 45 | 74 | 80 | 33 | 187 |

1. 研究部門

昭和38(1963)年設立当初の研究部門は原子炉研究部門、原子炉設備研究部門、ホットラボ設備研究部門、計測装置研究部門、廃棄物処理設備研究部門、放射線管理研究部門の6研究部門であった。その後、増設、設置が行われ平成6(1994)年7月1日現在で、16研究部門と2附属研究施設で構成されている。各研究部門等の設置年月日と担当教授一覧を表26-2に示す。なお、前述したように、現在、KURの整備拡充を柱として、6大研究部門、2附属施設に転換すべく計画中である。

表26-2 各部門設置年月日および担当教授一覧

| 研究部門名 | 設置年月日 | 担当教授名(在任期間) |
|-----------|------------|--|
| 原 子 炉 | 昭和38年4月1日 | 柴田 俊一(昭和38年4月1日～昭和62年3月31日) 藤田 薫顕(昭和63年7月1日～) |
| 原 子 炉 設 備 | 昭和38年4月1日 | 木村 毅一(昭和38年4月1日～昭和43年3月31日) 岡本 朴(昭和44年1月1日～平成4年3月31日) 岩田 豊(平成5年11月1日～) |
| ホットラボ設備 | 昭和38年4月1日 | 岡村 誠三(昭和43年4月1日～昭和45年2月28日) 岩田 志郎(昭和45年10月16日～平成3年3月31日) 玉井 忠治(平成4年8月16日～平成4年8月18日) 森山 裕丈(平成5年10月1日～) |
| 計 測 装 置 | 昭和38年4月1日 | 林 竹男(昭和39年10月16日～昭和58年4月1日) 岡野 事行(昭和62年4月1日～) |
| 廃棄物処理設備 | 昭和38年4月1日 | 山本 和夫(昭和38年4月1日～昭和39年3月31日) 筒井 天尊(昭和41年4月1日～平成元年3月31日) |
| 放 射 線 管 理 | 昭和38年4月1日 | 桂山 幸典(昭和39年10月1日～昭和62年3月31日) 松村 隆(平成2年10月1日～平成4年3月31日) |
| 低速中性子物理学 | 昭和42年4月18日 | 渋谷 巖(昭和54年2月16日～平成6年3月31日) |
| 原子炉熱特性管理 | 昭和44年4月1日 | 岡村 誠三(昭和45年3月1日～昭和47年3月31日) 西原 英晃(昭和54年4月1日～) |

第26章 原子炉実験所

| | | |
|---------------|------------|--|
| 原子炉核特性 | 昭和51年4月1日 | 木村 逸郎(昭和53年1月1日～昭和63年3月31日) 宇津呂雄彦(昭和63年7月1日～) |
| 放射線物性 | 昭和51年4月1日 | 東村 武信(昭和53年1月1日～平成3年3月31日) 前田 豊(平成3年4月1日～) |
| 原子炉計測制御 | 昭和52年4月18日 | 前田 豊(昭和63年7月1日～平成3年3月31日) 義家 敏正(平成4年12月1日～) |
| 原子炉物理学 | 昭和52年4月18日 | 藤田 薫頭(昭和61年11月1日～昭和63年6月30日) 神田 啓治(平成6年4月1日～) |
| 原子炉化学工学 | 昭和52年4月18日 | ―― |
| 原子炉化学 | 昭和52年4月18日 | 小山 睦夫(昭和61年12月1日～平成元年7月12日) 川瀬 洋一(平成5年8月1日～) |
| 核生物学 | 昭和52年4月18日 | 石田 政弘(昭和54年2月16日～昭和58年11月30日) 石田 政弘(昭和60年3月16日～平成2年3月31日) 内海 博司(平成4年9月1日～) |
| 放射線化学 | 昭和52年4月18日 | 山岡 仁史(昭和62年4月1日～平成4年7月31日) 松山 奉史(平成6年7月1日～) |
| 附属原子炉応用センター | 昭和50年4月1日 | ―― |
| 附属原子炉医療基礎研究施設 | 昭和51年5月10日 | 石田 政弘(昭和58年12月1日～昭和62年3月15日) 上野 陽里(昭和62年7月1日～平成3年3月31日) 小野 公二(平成3年11月1日～) |

2. 事務部および技術室(部)

事務組織は設立当初は事務長の下に事務長補佐が配置され、庶務掛、経理掛および用度掛の3掛による構成であった。昭和50(1975)年4月には事務部長制に改組され、総務課および経理課が置かれた。現在は総務課に専門職員、庶務、共同利用および図書の3掛、経理課には経理、用度、工営、電気および機械の5掛が置かれ、実験所の管理、運営が円滑に機能するよう包括的な事務を担当している。

技術職員の組織については、実験所設立当初は各部門単位に所属していたが、昭和52(1977)年4月に国立学校設置法施行規則により「技術室」の設置が認められ、研究の支援機構として技術的管理業務を総合的に行うこととなった。

この「技術室」にあわせて、平成3(1991)年1月に京都大学に総合技術部が設置されたことにより、その下部組織として同年2月に「技術部」が設けられた。「技術部」には、技術長の下に技術班長、技術主任および技術専門職員等が配置されている。

3. 安全のための組織

実験所の原子炉施設、放射線施設、核燃料物質使用施設に関わる安全のための諸業務は、開所以来、所長の統括の下に、研究炉部、放射性廃棄物処理部、放射線管理部の各部が担当してきた。また、昭和49(1974)年には臨界装置部が設けられた。また、これらの各部間の連絡調整を行い、かつ緊急時に対応するために中央管理室が、放射線に関わる保健管理のために保健物理管理室が設けられている。さらに、核燃料物質の安全管理に関する法令上の規制に対応するため、平成6(1994)年に核燃料管理室が設けられた。これらの部・室には所内の大半の教官と技官が配属され、互いに協力して運営されてきた。

安全上の重要事項を審議するため、当初から、原子炉施設の保安に関しては原子炉安全委員会が、放射線障害の発生防止に関しては保健物理委員会が設けられ、所内の安全管理の諸責任者および所内外の学識経験者等により構成されている。

第3項 運 営

1. 歴代所長

本実験所の運営の責任者である所長(任期は2年、再任可)の歴任者は、表26-3のとおりである。

表26-3 歴代所長

| 歴代 | 所長名 | 在 任 期 間 |
|----|-------|----------------------|
| 初代 | 木村 毅一 | 昭和38年4月1日～昭和43年3月31日 |
| 2代 | 岡村 誠三 | 昭和43年4月1日～昭和47年3月31日 |
| 3代 | 柴田 俊一 | 昭和47年4月1日～昭和55年3月31日 |
| 4代 | 林 竹男 | 昭和55年4月1日～昭和58年4月1日 |
| 5代 | 岡本 朴 | 昭和58年4月2日～平成元年4月1日 |
| 6代 | 西原 英晃 | 平成元年4月2日～ |

2. 協議委員会・審議会

実験所の重要事項の最終的な審議機関は協議委員会である。開所以来、協議委員会は実験所の専任教授と併任教授(日本学術会議、京都大学の他部局および大阪大学それぞれの推薦者)とで構成されてきた。しかし、実験所の研究活動の発展とともに教授定員は専任教授で占めることになったため、昭和60(1985)年に協議委員会の議を経て、原則として実験所の専任教授で構成する協議委員会と、新たに旧協議委員会と同じような委員構成の審議会が設置された。この結果、重要事項の審議機関としては、審議会と協議委員会が存在することになったが、その際、日本学術会議の協力を得て京都大学と大阪大学がそれぞれ同等の権限と責任をもって原子炉実験所の創設と運営の確立に当たってきた歴史的事実を改めて認識し、協議委員会は審議会の審議結果を尊重することを申し合わせた。

3. 運営委員会

実験所の運営に関する重要事項について所長の諮問に応じるため、開所以来、運営委員会が設けられている。主要な審議事項は、共同利用研究の制度に関する検討、共同利用研究採択の審査、教官人事の予選等に関するものである。委員は所内外ほぼ同数で構成されている。

4. 所員会議

実験所の運営に所内の各階層の意見を反映させるため、昭和41(1966)年に、所内運営に関する所長の諮問機関として所員会議が設けられた。所長を議長とし、部門担当の教授、事務部長および助教授・講師・助手・技官・事務職員の各職層より互選等により選ばれ所長が委嘱した者により構成されている。現在も広く所員の意向を所内運営に反映させるための場としての役割を果たしている。

第4項 共同利用研究

実験所は原子炉による実験およびこれに関連する研究を行うことを目的とし、国立学校設置法第4条第2項に定めるところの共同利用研究所である。

KURの共同利用研究を行うに当たっては、研究課題は公募により(平成2年度までは前期・後期採択制、平成3年度からは原則として通年採択制)採択され、それぞれの研究計画と一定のタイムスケジュールに従って、多数の研究者が来所し、実験研究に従事している。このほか KUCA、LINAC(電子線加速器)等の共同利用研究も行われている。平成5(1993)年度からはさらに共同利用研究の実をあげるため、プロジェクト研究が組織され実施されてい

表26-4 共同利用研究等採択件数および来所延べ人数

| 年 度 | 共同利用研究 | 研究会等 | 来所延べ人数 |
|-----------|--------|------|--------|
| 昭和39～43年度 | 588 | 155 | 8,884 |
| 昭和44～48年度 | 705 | 144 | 9,798 |
| 昭和49～53年度 | 805 | 131 | 9,297 |
| 昭和54～58年度 | 691 | 97 | 7,608 |
| 昭和59～63年度 | 675 | 95 | 6,588 |
| 平成元～5年度 | 646 | 85 | 7,634 |
| 合 計 | 4,110 | 707 | 49,809 |

る。ほかに時々の研究課題について研究者が討議、研究するための専門研究会、短期研究会(昭和62年度まで)、ワークショップ(昭和63年度より)等が開催されている。これらの採択件数、来所延べ人数等の状況を表26-4に示す。

これらの共同利用研究や実験所で行われた研究の成果はデータベース化されており、また実験所の学術講演会、プロGRESSレポート、アニュアルレポートやテクニカルレポートにて公表されている。

第5項 教育・国際交流

1. 教育活動

実験所では平成6(1994)年7月現在14研究部門が理学研究科(4部門)、工学研究科(9部門)、農学研究科(1部門)の学生定員の基礎となっており、関係する部門の教官および、それ以外の部門の教官もそれぞれの立場で、講義、特別実験、研究指導等の教育に当たってきた。特に KUR、KUCA および関連する施設を用いた学生実験や特別研究等は多大な成果をあげている。また、KUCA では昭和50(1975)年以来、本学以外の全国の原子力工学科系大学院学生(一部学生)を対象に特別実験を実施しており、平成5(1993)年現在で受講者が1,200名を超えた。

2. 国際交流

実験所では国際交流の一環として外国人研究者等を継続して受け入れており、その数は開所以来現在までに59名になる。また、現在までに、アメリカ合衆国ミズーリ大学研究用原子炉施設(昭和62年)、同オハイオ州立大学原子炉研究所(昭和62年)、同ミシガン大学フェニックス原子炉研究所(昭和62年)、同マサチューセッツ工科大学原子炉実験所(昭和63年)、同カリフォルニア大学バークレー校工学部(昭和63年)、同ロードアイランド大学総合科学部(平成3年)、アルゼンチン共和国クヨ大学バルセイロ大学院(昭和63年)、フランス共和国原子力庁(平成5年)の8研究機関との間に学術交流に関する覚え書き

を交換している。さらに、アメリカ合衆国アルゴンヌ国立研究所との間の「研究用原子炉燃料の濃縮度低減化に関する研究(昭和53年より継続中)」をはじめとして現在5つの国際共同研究を実施している。

第6項 主要な設備

(1) KUR(京都大学研究用原子炉)

KURは、スイミングプールタンク型の原子炉で、炉心は、93%濃縮ウランのMTR(アルミ被覆板状)型燃料要素と黒鉛反射体要素とからなり、軽水を減速・冷却材とした出力5,000kW、平均熱中性子束 $3.2 \times 10^{13} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の原子炉である。原子炉の制御は、ホウ素入りステンレス鋼製の粗調整棒4本とステンレス鋼製の微調整棒1本で行われる。原子炉に附属する実験設備には、実験孔(4)、照射孔(4)、熱中性子設備(重水、黒鉛)、圧気輸送管(3)、水圧輸送管、傾斜照射孔、貫通孔(各1)および炉心内で長時間照射を行う長期照射設備がある。また、これらの設備を利用して実験研究を行うための主要な設備・装置として重水熱中性子設備、黒鉛設備、冷中性子源設備、低温照射設備、中性子回折装置、ISOL(オンライン同位体分離装置)、中性子導管などがある。なお、平成5(1993)年12月までのKURの延べ運転時間は5万2,580時間、積算出力は $2.26 \times 10^8 \text{kWh}$ である。

(2) ホットラボラトリ

ホットラボラトリは原子炉室に接続して設置されており、RI(放射性同位元素)の照射後各種試験、化学処理、放射能測定等を安全に行うための施設である。

主要な設備としては、ホットケープ室、ジュニアケープ室、セミホット実験室、測定室および低温実験機械室などがある。

(3) KUCA(京都大学臨界集合体実験装置)

KUCAは、昭和49(1974)年8月に臨界に成功し、固体減速架台2基(A、B架台)と軽水架台(C架台)からなる複数架台方式のもので、それぞれ12角柱形

第26章 原子炉実験所

建屋を4分の1に区切った区画に設置され、各区画間は遮蔽壁(一部可動)で隔てられている。複数架台方式であるが、計測制御系統は1組しかなく、同時に2つ以上の集合体を運転することはできない。架台を置かない残りの4分の1区画には、パルス中性子発生装置がある。

(4) LINAC(電子線加速器)

LINACは、昭和42(1967)年2月に完成し、2本の進行波型加速管を持つLバンドの電子線加速器である。最高電子エネルギーは、46MeV、ビーム電流約5A(短パルス)および0.5A(長パルス)、パルス繰り返し数約400Hzの性能を持つ。加速された電子を重金属ターゲットに当て、発生する制動輻射 γ 線により中性子を発生させる。主要な付属装置として飛行時間法中性子スペクトロメータ、液体窒素温度における放射線照射装置等がある。

(5) トレーサラボラトリ

トレーサラボラトリは比較的弱いRIを使用して研究を行うための諸設備を設置してある。物理系実験室、化学系実験室、生物実験用の小室およびRI貯蔵室等からなっている。

(6) コバルト60 γ 線照射装置

本装置は昭和43(1968)年2月に完成し、照射線量率6～3万8,000 Gy/hの照射が可能な照射室と、各種測定器を備えた測定室からなる。特に、液体ヘリウム温度での照射や液体窒素温度での長期照射が可能であり、放射線照射の初期過程の研究には大いに役立っている。測定室には電子スピン共鳴測定装置、自記分光光度計が設置されており、照射直後の分光測定ができるようになっている。

(7) 放射性廃棄物処理施設

所内で発生する放射性廃棄物(固体および液体)を安全に処理するための施設で、主に廃棄物処理工場、タンクヤードおよび固形廃棄物倉庫からなる。またこのほかに放射性廃棄物に関する各種試験および実験研究を行うための測定室や試験室がある。

(8) 放射線管理設備

所内で発生する放射線を管理する設備で、その目的に応じて屋内放射線モニタリング設備、野外放射線モニタリング設備、ヒューマンカウンタなどが設置されており、放射線の安全管理のための監視を行っている。

第7項 附属施設

1. 原子炉医療基礎研究施設

本施設は昭和51(1976)年5月に設置され、原子炉熱中性子および放射線一般を用いた癌の治療と診断の基礎研究を行っている。平成2(1990)年2月から、医療照射が行われるようになり、平成6(1994)年6月現在46例の治療照射が行われている。

2. 原子炉応用センター(原子力科学館)

本センターは、原子炉およびその関連施設を利用しての試験、研究、開発等と原子力に関する知識を得、理解を深めるために必要であるとして、昭和50(1975)年4月に設置されたもので、広く一般社会に向けて開かれた形で運営されている。

第2節 研究活動の発展

昭和38(1963)年の開所以来、所員は相互に連携し、また所外の研究者との共同研究という形で、広範囲の分野で研究活動を行ってきた。以下に研究分野別に分類してその内容を紹介する。

第1項 核物理・核化学

(1) 原子核構造の研究

原子核構造に関する研究は昭和40(1965)年頃から本格的に始まり、熱中性子による核分裂や捕獲反応で生成される短寿命 RI を用いた種々の原子核に関する研究が今も引き続き行われている。独創的なマルチカウンタ・ゴニオメータ(昭和44年)が、また連続的に照射・測定が行えるオンライン照射測定装置(昭和47年)等が開発されて、半減期が1分程度の短寿命核種の精密測定がなされてきた。昭和53(1978)年頃よりヘリウム・ジェット型の ISOL(オンライン同位体分離装置)が開発設置され、数秒以下の寿命を持つ中性子数の極めて多い核分裂生成核種の測定が可能になった。特に希土類領域の核種に関する研究が精力的に行われており、昭和61(1986)年から平成2(1990)年にかけて、Pm-156、Nd-155、Pr-154およびCe-152といった新同位元素が発見され、それらの崩壊モードが決定された。平成3(1991)年から平成5(1993)年には4 Ge 角度相関測定装置や超短寿命測定装置を用いた、より詳細な実験が可能となり、中性子数58~60および88~90に現れる遷移領域に注目した励起準位構造の研究が行われている。これらの実験に並行して、振動回転結合モデルや相互作用するボソンモデルなどの核構造モデルを用いた理論計算

も行われており、理論と実験との比較検討がなされている。

(2) 崩壊核データに関する研究

原子炉熱中性子による核分裂または捕獲反応で生成される短寿命核種に関する核データが精密に測定され、原子力開発の基礎となる核データの提供が行われている。特に中性子の極めて過剰な核を含む核分裂生成物の核データは原子炉崩壊熱や天体物理学と関連して重要であり、主に KUR に附置された ISOL を用いてこれら短寿命核種の核データの測定が昭和56(1981)年頃より開始された。内容としては、短寿命核種の γ 線や β 線の測定による崩壊図式の決定、半減期の精密測定、 γ 線測定による遅発中性子放出率(P_n 値)の測定、半導体検出器による β 崩壊エネルギーの精密測定等である。対象核種としては主に質量数140~160の重い核で半減期数分以下のものが選ばれた。いずれのテーマについても独自の新しい測定手法が開発され、それによって世界的に第一級の精度で測定が行われており、従来の値がより正確な信頼性のあるものに更新されている。

(3) 核分裂片のオンライン同位体分離に関する研究

熱中性子による核分裂で生成される多くの中性子過剰短寿命核種は、その核的性質が未知のものが多く、原子核物理学上から興味ある研究対象であるばかりでなく、天体物理学、固体物理学、炉工学といった広い分野での研究に関連しても重要な存在である。その詳細な研究を行うためには、核分裂片を迅速にターゲットより取り出し、イオン化し、質量分離を行うオンライン同位体分離装置が不可欠である。本実験所では、KUHFRR に ISOL を附置すべく計画し、そのテスト装置を昭和53(1978)年に KUR に設置したが、KUHFRR 計画の遅滞に伴い、テスト装置を順次改良して上記の諸研究に利用してきた。すなわち、昭和56(1981)年頃より本体やシールド等を増強し、昭和60(1985)年頃より付帯測定器を含め本格的な装置としての改修を行った。希土類元素の酸化による高効率の表面イオン化法や最近の窒素ジェット法等の開発により、アルカリ、アルカリ土類および希土類元素に関しては極めて強いイオンビームが得られるに至った。現在、さらに効率よく多くの元

素を分離できるイオン源の開発研究等が続けられている。

(4) 摂動角相関法による核外場の研究

放射性原子核をプローブとして、角度相関の減衰の様子から原子核を取り巻く電磁場に関する情報を得る研究は、原子核分光学の手法を物性研究などに応用する新しい研究として、昭和40(1965)年頃から始められ、測定器の高性能化とともに研究内容も高度化して、発展を遂げてきた。これまで行われた主な研究テーマとしては、① Ho-166を用いた種々の化合物核外場の系統的研究、② In-111による In 金属の固体・液体の相転移に伴う結晶構造の変化、③ Hf-181をプローブとする Hf-Fe 準結晶中の内部磁場の温度変化、④ Ba-140を注入して YBaCuO 系高温超伝導酸化物中の Ba 位置の超微細磁場の測定、など摂動角相関法の特長を生かしたものを追究し、最近では、ISOL を用いた RI イオン注入法による新しい展開を試みている。

(5) 放射線測定に関する開発研究

原子炉を用いて生成される放射性原子核を研究するための放射線精密測定に関する開発研究が行われてきた。主な研究テーマとしては以下のようなものが挙げられる。

① 多カウンタ式高効率角相関測定装置

昭和40(1965)年頃から12個および8個の NaI(Tl) γ 線検出器を用いたマルチカウンタゴニオメータ、高分解能半導体検出器を用いた1-多カウンタゴニオメータと4 Ge(Li)ゴニオメータ装置が開発され、短寿命核種の構造解明に用いられている(昭和50年終了)。

② 放射線測定のための電子回路の開発

昭和40年頃から同時計数マトリックスをはじめとする放射線測定回路の半導体化、デジタル積分回路を用いたピークスタビライザ、マイクロコンピュータを用いた自動測定装置や角相関の同時測定ができる多次元波高分析装置の研究開発が行われ、研究能率の向上に寄与している。

③ 超短時間寿命測定

昭和62(1987)年頃から BaF₂シンチレータを用い、系統的なデータ処理の

手法と組み合わせて、複雑な崩壊図式を持つ原子核のピコ秒領域の励起準位の寿命測定研究が実現された。

④ 多次元摂動角相関測定法

昭和58(1983)年頃から核物理学の手法を物性研究に応用するための新しい測定法が開発され、固体から液体への相転移の構造変化の解明などに威力を発揮している。

第2項 炉物理・炉工学

(1) 中性子の核反応断面積に関する研究

本研究は、次の3つに大別できる。まず、電子線型加速器を用いた飛行時間分析実験では、共同利用が開始された当初(昭和41年頃)より、熱中性子から高速中性子領域に至るエネルギー領域において、中性子全断面積および中性子捕獲反応断面積の測定、原子炉材料集合体中のスペクトル測定と輸送理論計算値との比較による核データの積分評価が主たる研究課題として挙げられる。その中でも、トリウムに関しては、昭和56(1981)年頃より始まった文部省エネルギー特別研究などにおいて注目すべき成果が多く得られている。平成3(1991)年には、電子線型加速器と組み合わせて鉛減速中性子スペクトロメータが設置され、共鳴中性子領域におけるアクチニド系核種の核分裂断面積の測定が実施されている。

昭和60(1985)年に入ると、KUCAに附設の14MeV強力中性子源を用いて、核融合炉設計に有用な核データの測定のみならず、核融合-核分裂ハイブリッド炉の基礎研究として、特にブランケット領域にトリウムを装荷する場合の研究が開始されている。

昭和40年代から、原子炉を用いた標準的な中性子場として、マックスウェル分布型の熱中性子場、1/E、および核分裂中性子の場におけるスペクトル平均の中性子放射化断面積の測定、誤差評価法の確立、および実験値による評価済み核データの積分評価が行われている。

第26章 原子炉実験所

(2) 原子炉の核的特性に関する研究

原子炉の核的特性に関する研究は、昭和39(1964)年に初臨界を達成した KUR の建設計画とともに始まり、昭和49(1974)年の KUCA 完成によって新しい局面を迎えた。KUCA 完成当初は、京都大学 2 号炉の設計研究が主流であったが、ウラン-プルトニウム燃料サイクルに代わり得るトリウム燃料原子炉に関する基礎研究も開始された。2 号炉関連の研究は、やがて結合炉の研究あるいは新型研究炉の開発研究に引き継がれ、昭和53(1978)年度からは日米共同研究として研究炉に使用するウラン燃料の濃縮度低減化研究が開始された。そして、昭和56(1981)年に世界で初めて中濃縮ウラン燃料を用いた臨界実験が行われた。昭和59(1984)年度からは臨界安全性に関連する研究が始まり、未臨界度の測定、不均一燃料分布炉心の核特性研究が行われている。昭和61(1986)年度からは稠密格子炉心の核特性に関する研究が始まった。この研究は、高転換軽水炉の開発に関連し、大学連合の共同研究として行われている。これに関しては、平成 5 (1993)年に日仏協定が成立し、京都大学原子炉実験所を代表とする大学連合と CEA(フランス原子力庁)の間で協力研究が行われている。

(3) 中性子による核分裂の研究

昭和43(1968)年に KUR が最大熱出力5,000kW になるとともに、原子力の源である原子核分裂に関する実験研究が開始された。わが国においては、核分裂関連の研究は少なく、特に実験研究は、核燃料物質を扱える施設が限られていることから、2、3カ所で行われているのみである。本研究の目的は、中性子による核分裂を通して、核分裂のメカニズムの解明に迫ることにある。実験は、KUR のスーパーミラー中性子導管実験設備を用い、U-233、U-235および Pu-239について、核分裂片の質量分布、運動エネルギー分布、分裂時に発生する即発中性子数等の測定が行われてきている。測定法として、核分裂時互いに反対方向に飛び出す分裂片の速度と運動エネルギーを同時に測定する「二重速度二重エネルギー測定法」を用いている。この方法は本実験所で、独自に開発されたものである。これまで、上記 3 核種につい

て、精度のよいデータが得られており、新しい知見を基に、核分裂モードに関するモデルとの比較検討が行われている。

(4) 原子炉放射線ドジメトリに関する研究

原子炉は強力な中性子源であるとともに、核分裂で生ずる γ 線、 β 線等の種々の放射線が同時に放射される。放射線照射場でのこれら混在比は原子炉タイプや照射場の炉心からの位置により変化するため、原子炉の照射実験(特に生物、物性、化学)では照射場の個々の放射線特性を考慮しないと照射効果の評価ができない。混在する放射線を分離して測定評価することは至難に近く、昭和39(1964)年、KUR 初期特性試験で各実験照射場の放射線線種とフルエンスが種々の材質の電離箱、フィルム、ガラス線量計、TLD(熱蛍光線量計)を用い測定された。この結果、金箔とTLD併用による熱中性子と γ 線の分離測定法が確立された。さらに原子炉照射場で物質の放射線吸収エネルギーを直接絶対測定する微少熱量カロリメータが開発され、種々の物質の吸収線量の絶対測定が行われた。一方、放射線場から理論計算で得られる吸収線量との相関を調べ、逆に特定物質(鉛、アルミ、ポリエチレン、弗化リシウム)の吸収線量の違いを用いて原子炉照射場の熱中性子、速中性子、 γ 線の混在比が評価された。これらの実績により国内、国外の研究用原子炉照射場の放射線特性を明らかにし、照射効果の評価に役立てられている。最近では原子炉での医療照射の線量測定、エッチピット法による速中性子と熱中性子の分離測定が行われるなど、原子炉放射線の線量測定に関する総合的な研究が行われている。

(5) 原子炉の安全性に関する熱流動現象の研究

本実験所における熱流動研究は、昭和48(1973)年頃、2号炉の熱水力・安全性研究から始まった。これは同炉の安全審査が終わる昭和53(1978)年まで続き、その後、模擬炉心および燃料要素の流水試験などを実施、炉心熱水力特性を確認した。これらが一段落した昭和54(1979)年からは、研究炉燃料低濃縮度化に関する熱水力研究が、米国アルゴンヌ国立研究所との共同で進められた。昭和55(1980)年より、原子炉の安全性向上に関する研究の一環とし

第26章 原子炉実験所

て限界熱流動の研究と、気液二相流の特性研究とが開始された。以後これらの研究は、本実験所における熱流動研究の2つの大きな流れとなる。もう1つの流れは、中性子ラジオグラフィを応用した流動現象の可視化である。本実験所では、昭和50(1975)年頃より実時間中性子ラジオグラフィの研究が進められていたが、これと熱流動研究との協力により、昭和59(1984)年頃より、流動現象の可視化と画像処理による計測が開始され、ボイド率の定量技法が提案された。昭和63(1988)年には研究炉熱特性実験装置が完成し、平成元(1989)年より同装置の共同利用研究が始まった。同装置付属の直流電源は5,000Aの大電流供給が可能であり、現在、これを利用して超高熱負荷除熱の実現を目指した熱流動研究が進められている。

(6) 原子炉総合異常診断システムの開発

昭和45(1970)年に「原子炉の計算機制御に関する研究」として開始された。それまで大型・中型計算機システムで実施されてきた原子炉制御系のデータ処理をいち早くミニコンピューターを導入して、原子炉制御系のオンラインシステムとして原子炉の特性試験などに利用した。研究成果は国際会議や学会で発表し、本実験所においても2回の短期研究会を開催した。昭和54(1979)年には「原子炉の安全確保のための基礎研究」、次年度からは「原子炉の安全性向上に関する研究」として引き継がれた。昭和57(1982)年になって武蔵工業大学、近畿大学や立教大学の研究炉にも計算機システムが導入され、本実験所でも「原子炉総合異常診断システム」としてシステムを更新した。現在、このシステムは原子炉特性試験や異常信号発生時の解析に利用されている。最近では、計算機制御は種々の制約があって実施不可能なために、ロギング、データ処理、データベースや異常診断システムとしての研究に向けられている。

(7) 原子炉耐震設計に関する研究

堆積地盤(第四紀層)上に立地する原子炉建屋の耐震安全性の評価と向上を目的として、昭和58(1983)年からKUR建屋の振動特性が実験および地震観測などから検討された。その結果、建屋の振動特性は地盤との相互作用に大

きく依存し、地震応答解析では建屋・地盤系の適切なモデル化と解析手法の必要性が示された。また、耐震安全性を向上させるためには設計用入力地震動の適切な評価が不可欠であり、敷地内などでの地震観測結果を用いた強震動予測に関する研究が防災研究所との共同で昭和63(1988)年から始められ、現在提案した手法の有効性の検証や実用化に向けた改良が実施されている。なお、提案した方法(経験的グリーン関数法)を、これまで国内外で発生したいくつかの大地震時の強震動シミュレーションに適用し、良好な結果が得られた。

第3項 低速中性子物理・中性子散乱

(1) 冷中性子源の開発と利用

4 オングストロームより長波長の中性子は冷中性子と呼ばれ、生体物質や高分子材料における分子構造の研究や中性子光学的な基礎物理の研究に適している。通常の原子炉では冷中性子の強度は非常に小さく、中性子スペクトルにおけるその割合は約1%にすぎない。しかし、約20Kまで冷却された冷減速材を用いると数十倍の冷中性子利得が得られる。昭和50(1975)年、冷中性子源の開発を目的として調査が開始され、昭和54(1979)年に凝縮器と冷減速材槽、それらを連結する液体水素移送管を有する密閉式液体水素循環器が製作された。これを用いて冷減速材槽に加えられた熱負荷と液面の関係が液面制御の面から調べられ、自己平衡性を有する冷中性子源の知見が得られた。昭和59(1984)年液体重水素を冷減速材として用いる冷中性子源設備をKURの黒鉛設備内に設置すべく科学技術庁との交渉が開始され、昭和60(1985)年、基本設計後、30名近い所員の協力の下に製作が開始された。昭和61(1986)年6月わが国では最初の原子炉冷中性子源が完成し炉外の建屋でその安全性等の性能試験が行われた。昭和62(1987)年熱負荷の変動に対しても液面が安定に保たれる自己平衡性を有する冷中性子源設備が黒鉛設備内に設置され、現在、冷中性子源の4個の実験孔で超冷中性子実験、小角散乱実

験、スピネコー実験、中性子干渉実験などが行われている。

(2) 極冷・超冷中性子の発生と超冷中性子実験

近年、速度10m/s程度以下(波長約400オングストローム以上)の中性子は特に超冷中性子と呼ばれるようになったが、このような中性子は金属鏡により常に全反射するなどの興味ある特性を示すことから、いち早く昭和52(1977)年より超冷中性子実験が着手され研究の基礎が固められた。昭和62(1987)年には、液体重水素冷中性子源設備から多量に得られる速度約50m/s(80オングストローム)の極冷中性子を超冷中性子に変換するスーパーミラー式中性子タービンが完成し、国内で初めて超冷中性子の強力発生に成功した。その後平成5(1993)年には、さらに、タービンの羽根構造を改造して超冷中性子強度を一層増強するとともに、超冷中性子を閉じ込めるボトル実験および重力場や磁場を応用した超冷中性子利用実験が始められている。

(3) 多層膜中性子ミラーおよび中性子反射率法による表面・界面構造の研究

中性子を全反射する中性子ミラーの研究は昭和45(1970)年頃から開始され、昭和50(1975)年日本では最初のニッケルミラーを用いた中性子導管がE-3実験孔に設置された。以来スピネコー装置の開発をはじめ、低磁場用磁気ミラーの開発、生物照射にと使用されている。昭和50年、長波長中性子用に長周期の人工格子である多層膜ミラーの研究が開始され、昭和55(1980)年、ニッケルミラーに比べ短波長の中性子まで全反射させられるニッケル-チタン多層膜を用いたスーパーミラー中性子導管が世界で初めてB-4実験孔に設置された。スーパーミラーの臨界速度はニッケル鏡の約2.4倍であり、特性波長は約1.2オングストロームである。そのため、ニッケルミラー中性子導管の約20倍の中性子強度が得られている。層の厚さを等しくした等厚多層膜は、結晶モノクロメータが使用できない長波長中性子のモノクロメータとして利用され、KURでは2回転反射型モノクロメータが開発された。また、鉄コバルト合金とバナジウムを交互に蒸着した多層膜磁気ミラーを用いると中性子の偏極と単色化が同時に行われ、中性子偏極解析装置や中性子ス

ピンエコー解析装置、小角散乱装置などに利用されている。一方、昭和45年以来、中性子ミラーの特性測定を目的として開発されてきた中性子反射率測定系は、各種中性子ミラーの反射特性のみならず蒸着金属薄膜中の水素濃度分布の測定や、重水素置換法を併用した高分子薄膜の界面構造の研究に用いられ大きな成果をあげている。これら薄膜による中性子反射率データの解析には、新たに開発された中性子光学的手法による計算法が用いられ、界面粗さについても考慮できるようになった。

(4) 中性子小角散乱実験

冷中性子源設備より得られる長波長の中性子の利用を目的とした広帯域中性子小角散乱装置の開発が昭和62(1987)年から始められた。この装置では、独自開発による Ni-Ti の多層膜鏡を用いた中性子モノクロメータと大面積中性子2次元位置検出器が利用されている。平成3(1991)年の冷中性子導管実験室の完成とともに冷中性子小角散乱の実験が本格的に始まり、合成高分子および生体高分子の構造解析に関する研究が行われるようになった。これまで鉄貯蔵タンパク質フェリチンや高分子の結晶化過程などの研究が進められてきた。

(5) 中性子の準弾性、非弾性散乱実験

昭和55(1980)年、B-4 スーパーミラー中性子導管に逆転配置式スペクトロメータが設置され、ビーム取り出し機構、中性子検出器の多数化、バックグラウンドの低減化などの性能向上が行われた。現在、水および電解質溶液におけるイオンの水和、金属中の水素の挙動、非晶物質における動的構造などが研究されている。

(6) 中性子散乱による実用金属材料の力学物性研究

中性子散乱、回折法は純金属結晶、鉄鋼多層材、繊維強化複合材、傾斜機能材料などの結晶粒内・粒間すべりに伴う微視的弾性、塑性変形、疲労、残留内部応力の研究に有用である。昭和50(1975)年以来、すべり変形、モザイク構造の広がり・整列化の結晶方位依存性が、小角二重ブラッグ反射を飛行時間で測定することにより調べられてきた。一方、残留内部応力測定は、3

つの散乱角に点検出器を設置し、各ブラッグ反射のピークの変位量を飛行時間法で同時計測し、3つの垂直ひずみを求め調べられている。また、2基の1次元位置感応型検出器が相補的に内部応力測定に使われている。

(7) 中性子回折による強誘電体および水素結合性高分子の研究

中性子回折法は水素原子が重要な役割を持つ水素結合型強誘電体相転移現象や重金属結晶中における軽い元素の挙動の研究には欠かせない実験手段であり、これまでも、種々の強誘電体や強弾性体相転移現象の解明に4軸型中性子回折計が使用されてきた。近年、誘電体における同位元素効果に関して、重水素置換法を併用した中性子回折法により原子置換率が決定され、新しい知見が得られている。一方、水素結合は低分子だけでなく、 $10^2 \sim 10^6$ 個の繰返し単位(モノマー)が共有結合で連鎖した高分子中においても形成され、低分子に見られない特徴を与えている。特に、水素結合性高分子の水素結合部や疎水性部分への水または極性、非極性分子の吸着や包接に関する研究が中性子回折法により行われている。現在、中性子回折は単なる構造決定の一方法としての地位から脱却し、動的な観点を含む新しい固体物性の測定手段としても活用されている。KURの4軸中性子回折計には最新技術が絶えず導入され、今後ともこの方面での活用が期待されている。

(8) 中性子回折による磁性体の研究

KURが出力を5 MWに上昇した昭和44(1969)年以降、磁性体研究は本格化した。まず取り上げられた希土類合金の磁気構造は局在スピ間に働く長距離振動型の間接的磁気相互作用、大きな結晶場効果、磁気弾性効果などの競合の結果、単純な強磁性からヘリカルやサイクロイダルなどの様々な変調構造を示す。このようなスピンの変調構造を調べるには中性子回折が威力を発揮する。重-軽希土類 hcp 型 2 元合金、3 元合金において磁気相図が初めて系統的に決められた。イジング型長周期逆位相構造などの新しい変調構造が見出され、磁気相図とこれらの示す高次磁気反射の存在が簡単な分子場理論により説明された。昭和60(1985)年頃から高圧、高磁場という一種の極端条件下での中性子回折を目指して装置の開発に力が注がれ、3 GPa、2.2

K、縦磁場5テスラ、2.2Kまでの条件下での測定が可能になった。希土類金属や希土類化合物の変調構造の圧力効果や、圧力による磁気転移、 RbCl における圧力誘起相転移のメカニズムなどが明らかにされている。また、イジング型磁気変調を示す RT_2X_2 (R:希土類、T:遷移金属、X:Si,Ge)化合物における磁場による1次元変調→2次元変調相転移、 RbMnBr_3 などの三角格子反強磁性体の磁場中相転移、希土類合金の(H,T)相図が系統的に調べられている。

(9) 多層膜ミラー中性子干涉計の開発と応用

昭和63(1988)年多層膜ミラーを用いた多層膜中性子干涉計の開発研究が開始された。多層膜ミラーを用いるとシリコン完全結晶干涉計に比べ長波長中性子に適用できるのでより小さい相互作用に対する知見が得られる。また磁気ミラーを用いることができ、寸法的にも自由度が大きい等の特徴がある。その実用化のためには多層膜ミラーをミクロスケールの精度で設置する必要があり、そのための技術開発が行われている。また、同時に、多層膜中性子干涉計の特徴を生かした研究テーマの具体的検討が行われている。

第4項 燃料・材料工学

(1) 研究用原子炉燃料濃縮度低減化の研究

研究用原子炉に使用するウラン燃料の濃縮度低減化研究は、昭和53(1978)年度から日米共同研究として始まった。これは、世界的な試験、研究用原子炉燃料の濃縮低減化政策の一環であり、当初は、当時計画中であったKUFRのウラン燃料の濃縮度を低減化することが目的であった。昭和56(1981)年にはKUCAで、世界で初めて中濃縮ウラン燃料を用いた臨界実験が行われ、臨界が達成された。また、昭和55(1980)年から昭和56年にかけて米国ORR(オークリッジ国立研究所の研究炉)において、中濃縮ウラン燃料のミニプレートが照射され、照射済み燃料の高温時における核分裂生成物の放出挙動に関する研究が行われた。その後、KUCAで高濃縮ウラン、中濃縮

ウラン燃料の混合炉心実験等が行われた。現在は、KURの高濃縮ウラン燃料を低濃縮ウラン燃料へ転換することを目標として研究が継続されている。

(2) 半導体材料に関する放射化学的研究

昭和60(1985)年から中性子放射化分析法により、シリコン単結晶中に含まれる不純物元素の濃度分析に関する研究が開発された。まずシリコン単結晶中の不純物36元素について、検出限界を半実験的に求め、実際の検出限界との比較が行われた。その結果それらの値の間は、ほぼ比例関係にあたることが明らかになった。次にシリコン単結晶の原料であるポリシリコンと、つばの材料である石英とどちらの方が不純物の寄与が大きいかの検討が行われた。さらにシリコン単結晶中の不純物元素の濃度分布が固化率の関数として求められた。その結果、ほとんどの元素について、既に報告されている偏析係数よりも数桁大きい値を示すことが分かった。この事実から偏析係数は、不純物の濃度に依存すると思われるので、金とイリジウムについて濃度を変化させたシリコン単結晶を作成し、偏析係数が調べられている。

(3) 金属・合金照射の研究

各種金属・合金の放射線損傷の研究を目的とし、昭和40(1965)年から昭和50(1975)年にかけて、銅(Cu)-ベリリウム(Be)、Cu-アルミニウム(Al)などの放射線照射効果、特に中性子照射による時効析出現象の研究が進められた。Cu-Alについては高分解能電子顕微鏡ウィークビーム法により格子欠陥・析出粒子等の観察・研究が昭和60(1985)年まで継続された。この際、ウィークビーム法に独自の手法を開発し、内外から高い評価を受けた。また、原子炉低温照射装置を用いて20K前後で中性子照射した金属材料の電気抵抗法による相転移の研究、低温における機械的強度試験などの基礎研究が昭和40年から平成2(1990)年に進められた。昭和56(1981)年から平成2年には、ニオブ3スズ(Nb₃Sn)、ニオブ3アルミ(Nb₃Al)などのAl 5型超電導線材の照射効果が調べられた。核融合炉材料に関連して、アルミニウム合金、オーステナイト鋼等について、機械的強度試験(計装化シャルピー衝撃試験、引張試験など)および走査電子顕微鏡による破面観察が行われ、照射損傷や照

射欠陥が調べられた。昭和61(1986)年から平成2年には、金属照射研究で駆使した高分解能電子顕微鏡の技術で、酸化物高温超電導体の規則構造の観察が行われた。

(4) 材料照射効果に関する研究

材料の中性子照射効果の研究は、物理としては高エネルギー粒子と固体内原子との相互作用機構の理解と損傷構造発達過程の解析およびその物性の解明という観点から、また工学としては原子炉材料、核融合炉材料等の耐照射材料の開発および照射効果を用いた新素材の開発という観点から、KURの設置当初から行われてきた。照射損傷機構の基礎研究として得られた最近の主な結果は、①カスケード構造の同定とカスケード重畳効果の検出(昭和61年)、②中性子エネルギースペクトルの効果の解析(平成2年)、③点欠陥集合体の成長を点欠陥反応のアンバランスによるとした統一的理解(平成5年)、④点欠陥反応のゆらぎの効果の検出(平成5年)、⑤Cascade Localization Induced Bias 効果の提唱(昭和63年)等がある。また現在高度化する材料照射研究者の要求に応えるために、各種の制御照射が可能な照射管の設置計画が進行中である。

第5項 物性・放射線効果

(1) 絶縁性結晶における放射線照射効果の研究

本実験所ではイオン結晶や芳香族炭化水素等の電気絶縁材料における原子炉中性子を主とする放射線照射効果が低温および常温照射下で研究炉部に属する研究者を中心に研究されている。昭和40(1965)年頃には芳香族炭化水素系有機減速材の照射効果が研究され、特にナフタリン中の励起2量体の挙動が明らかにされ、わが国のこの種の研究の先駆けとなり注目された。昭和45(1970)年頃には中性子照射した MgF_2 、 MgO 単結晶中に生成される色中心のゼロホノン線の特徴が研究された。昭和55(1980)年頃には遷移金属不純物を添加した MgO 単結晶において中性子照射により導入された格子欠陥が不

純物電子の遷移確率に大きな影響を与えることを見出し、その機構を明らかにした。最近では、常温照射で高い放射線耐性を持つ TiO_2 (メチル) 単結晶中に 20K 中性子照射で低温でのみ安定な照射欠陥が導入されることを見出し、その性質が研究されている。また、窒化物、炭化物、フラーレン等の照射効果に関する研究も進められている。

(2) 低温照射による固体結晶の格子欠陥の研究

昭和43(1968)年、KUR の E-4 実験孔に低温照射装置が設置された。その性能は、照射温度約 20K および最高高速中性子線量約 $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ (77時間運転中の積算) である。この装置を用いて金属、半導体、絶縁性結晶、有機化合物等固体材料の特性を支配する格子欠陥の基本的性質を明らかにする研究がなされ現在まで多くの成果が得られてきている。昭和50(1975)年頃まで、純金属およびその合金中に生成される点欠陥の回復過程が電気抵抗、内部摩擦、電顕観察等で、また、イオン結晶中の色中心の生成機構、半導体中の照射欠陥の電気特性に及ぼす影響等の研究がなされた。特にニオブ中の転位挙動の素過程の解明に関する研究は高く評価されている。昭和55(1980)年頃には、核融合炉用超伝導マグネット材料の照射効果が研究され、 Nb_3Sn や Nb_3Al の低温照射特性が明確にされた。昭和61(1986)年頃から、酸化物高温超伝導体の照射効果が主に研究され、臨界電流の大幅な改善効果や、ランタン系化合物において臨界温度に大きな影響を与えること等、注目すべき多くの成果が得られた。これらの材料の低温照射効果に関する研究は現在も意欲的に進められている。

(3) メスバウアー効果による物性研究

通常よく利用されている Fe-57核のほかに、原子炉で製造される RI を利用して I-129、Ir-193、Au-197などの核種のメスバウアー効果およびそれを用いる物性の研究が昭和39(1964)年より幅広く行われている。Fe-57核については、金属・合金の研究のほかに、鉄に関係する生体関連物質、特にヘムタンパク質の電子状態に関する研究などが行われてきた。I-129核については、ヨウ素分子の関与する電荷移動錯体における分子間相互作用の研究、ま

たヨウ素を添加することにより機能を発現するポリアセチレンなどの導電性高分子の電子状態、さらには超伝導物質の電子状態と構造に関する研究などが進められてきた。また、Ir-193、Au-197核のメスバウアー分光では、重金属錯体の化学結合の研究のほか、金属・合金の磁性研究が行われ、最近では人工格子など新しい材料の物性研究も行われている。

(4) 有機凝縮相物質の放射線物理化学初期過程の研究

放射線照射された有機物質中に生成するイオン種やラジカルは極低温で照射すると、極低温にしておくかぎりそれらの寿命は著しく長くなる。こうした条件下で、 γ 線照射後、ESR(電子スピン共鳴)、分光吸収、振動分光、蛍光寿命測定の手段を駆使して、放射線初期生成種の物性や反応性に関する研究が昭和40(1965)年頃から行われてきた。今までに行われた研究テーマは以下のとおりである。①溶媒和前捕捉電子の物性と溶媒和機構の研究、②極低温における負イオンの前駆体の研究、③常磁性生成種間の磁氣的相互作用の研究、④ラマン分光法による被照射固体、特に有機ガラスの構造変化の研究、⑤極低温ラマン分光法による分子性生成種、特に水素分子の生成機構の研究、⑥ピコ秒蛍光寿命測定法による正負イオン再結合過程の研究。

(5) 生物起源磁性物質の研究

走磁性バクテリアが発見されて間もなくの昭和54(1979)年頃より生物起源磁性物質の研究が行われている。マグネタイト、ゲーサイトなどの磁性体を歯の主成分とするヒザラガイ、ツタノハガイなどを対象として、生物起源磁性物質の物性とそれらの生合成過程について、磁化測定、メスバウアー分光、中性子散乱などにより研究が進められている。

第6項 放射化学・放射化分析

(1) ホットラボおよびKUR照射設備の開発・特性試験等の研究

新設のホットラボラトリに設置された安全取り扱い設備の特性試験が昭和39(1964)年度に行われた。ホットラボラトリの諸設備は原子炉照射と照射後

に行う実験の、インターフェイスの機能を持つので、この安全テスト以来様々な要請に應えて、教官と技官が協力して、また時にホットラボ設備研究部門と原子炉研究部門との共同で進められた特性試験や照射技術の開発、あるいは新しい照射試料の安全テスト等は、原子炉照射実験に関する技術的研究として位置付けることができる。初期から続けられている課題に「原子炉の水化学」がある。1次冷却水中の放射性核種、特にFP(核分裂生成物)を同定・定量し、またそれらの起源を明らかにすることが、燃料や原子炉の異常診断に資するとの考えに基づいて着手された。1次冷却水中のFPは、初期の頃は燃料板表面を汚染していたU-235(1ft²当たり約1μg)に由来していたが、昭和50年代以降は主として炉心部構成材(アルミニウム)中に不純物として存在するウランに由来し、これが平常レベルを規定していることが明らかにされた。その他この種の研究に属するものとして、低温照射装置の特性試験(昭和40～44年)、圧気輸送管あるいは傾斜照射孔におけるドライアイス温度照射の試験研究(昭和41～42年)、5 MW 出力上昇時における圧気輸送管の温度特性試験(昭和43年)、変形黒鉛反射体要素の調査試験(昭和51年)、HFR 反射体容器および炉心容器の設計(昭和55～58年)、長期照射設備および関連機器の性能試験(昭和55～58年)、実験照射設備の中性子スペクトルの測定(昭和55～60年)、黒鉛設備圧気輸送管の特性試験(昭和61～平成元年)等を挙げることができる。いずれも、原子炉の健全性の確認・保持あるいは照射実験の質の向上に寄与してきた。

(2) 放射化分析の方法論的研究および分析精度改善の研究

放射化分析は研究用原子炉の利用目的として普遍的なものであり、広い分野で利用され、ユニークな成果をあげてきた。その間、分析精度改善の研究が一貫して進められてきた。30余年の間に放射化分析の技術は大きく進歩した。昭和40年代前半では、NaI(Tl)シンチレータによってγ線を検出していた。また、定量したい元素すべてについて標準試料を用意し、それとの比較によって定量する「比較法」が一般的であった。昭和41(1966)年頃に、放射化断面積やγ線放出率のような核定数を標準試料の代わりに用いる「絶対

法」によって多元素を同時に定量する研究が開始された。昭和40年代後半にエネルギー分解能の高いGe(Li)半導体検出器が設置され、化学分離することなく多元素を同時に分析することが容易になった。昭和50年代にはデータ出力装置が磁気テープに代わり、計算機によるデータ処理も容易になり、種々の解析プログラムも開発され、大量のデータが収集・処理できるようになった。それとともに「絶対法」の有用性が高くなった。基本的には「絶対法」を用い、これらの分析値を標準試料の分析値と比較する両法の折衷的な方法も一般化し、この場合の標準試料の研究が進められた。さらに、分析結果に重大な誤差を生じる要因について検討が行われた。すなわち、照射中の自己遮蔽、揮散、キャプセル内の中性子束分布およびスペクトル変形等の問題、照射後の揮散損失、波高分析器の不感時間の補正などの測定上の問題についての検討である。昭和63(1988)年度に高エネルギー中性子の少ない黒鉛設備に圧気輸送管を設置し、放射化分析の適用範囲が拡張でき、また精度が高められた。

(3) 筋萎縮性側索硬化症発病要因の研究

筋萎縮性側索硬化症は紀伊半島の牟婁地方等に多発する難病である。その原因究明を目的として、昭和40(1965)年から、和歌山県立医科大学との共同研究で疫学的環境分析が行われた。多発地域(牟婁地方をはじめグアムなどの南太平洋地域)の河川、土壌、飲料水、空気、植物などに含まれる金属元素の量が放射化分析法で求められ、それらの影響が検討された。昭和50年代中頃に、多発地域の河川、土壌、飲料水等はカルシウムやマグネシウムの濃度が低く、一方、アルミニウムの濃度が高いことが明らかにされた。アルミニウムは神経毒を有し、中枢神経組織や骨組織に沈着すると種々の疾患を誘発する。ラットを低ミネラル・高アルミニウム食で飼育し、骨の形成過程における金属元素の生体内への吸収動態の研究や神経難病への垂鉛や鉄の関与についての検討が進行中で、それらの関連試料の微量元素分析について、プラズマ発光分光分析法の併用や精度の高い放射化分析の手法の研究が並行して進められている。

(4) 水圏の元素循環過程と極地氷床下の環境変遷の研究

海洋や湖沼の堆積物は、それらが堆積した時代における地球環境の様相を何らかの形で記録している。それらを同位体、元素、化合物のレベルで解析することにより、地球上における大きな環境変化と対応した地球規模の元素の循環過程が明らかにできる。昭和49(1974)年から琵琶湖や海洋など水圏の堆積物の核種分析が放射化分析法により着手され、昭和60(1985)年まで続けられた。また、南極の氷床には、大気を通して運ばれた宇宙起源の諸物質が微量元素として閉じ込められており、これら大気由来物質の測定からその環境変遷を明らかにすることができるので、昭和60年代には氷床中の微量元素分析が進められ、水圏における元素循環や氷床中の環境変遷を解明する研究が行われた。

(5) 生体中微量元素の生物無機化学・生物地球化学的研究

生体中には生命維持の必須元素以外にも多くの微量元素が取り込まれている。これらの生体内分布やその濃度、化学形態は生物種や器官によって異なり、また生育環境因子によっても変わる。昭和55(1980)年以来、陸上植物の葉中の微量元素濃度が、植物種生育土壌、水との関連の下に放射化分析法で調べられている。約40元素が定量された結果、特定元素を集積する植物が見出された。集積植物と集積元素とは特定の組み合わせがあり、ツバキ科(アルミニウム)、ヤナギ科(亜鉛)、トウダイグサ科(コバルト)、オシダ科(ランタニド)など科単位で集積が見出されている場合と、イヌツゲ(亜鉛)、コシアブラ(マンガン)のように特定の種だけが集積性を示す場合のあることが明らかにされた。また、昭和54(1979)年からは軟体動物である貝類についても生育環境との関連で研究され、種類によって銅あるいはマンガンを集めやすいものがあることが明らかにされた。天然や人工の放射性核種の生体濃縮や食物連鎖の基礎的データとして、集積の機構、生体中での化学形、生化学的な役割についての解明が試みられている。

(6) ホットアトム化学

リンのホットアトム効果の研究が昭和40(1965)年から昭和55(1980)年にか

けて進められた。自然界において重要な役割を果たすリン化合物について、 $^{31}\text{P}(\text{n}, \gamma)^{32}\text{P}$ 反応で生じるホット P-32原子の挙動を分子レベルで究明することを目的として、一連のフェニルリン化合物、炭水化物のリン酸エステル類、ならびに無機リンオキソ酸類を、固体または溶液状態で原子炉照射し、P-32で標識された反跳生成物をペーパークロマトグラフィおよび電気泳動法で分離して調べた。照射条件(熱中性子束、熱外中性子束、 γ 線量、照射温度、空気存在・不在)、標的リン化合物の化学形、溶液の場合の溶媒の化学形や濃度、照射後のアニーリング、化学分離時の条件等の影響を詳しく調べ、その結果を基に、ホット P-32原子の反応について一般性のある反応機構が提唱された。DNA(デオキシリボ核酸)中のリンの核反応の化学的效果についても、P-32のリテンションの変化ならびに照射生成物の変化が調べられた。同時に P-32の放射能測定から DNA 中のリンを定量する方法の開発が試みられ、感度が高い長所を利用して、当時、多量の試料採取が難しかった無脊椎動物の細胞中のDNAの量を求めることができた。また、昭和41(1966)年から昭和45(1970)年にかけて、フタロシアニン銅錯体中の銅(^{63}Cu , ^{65}Cu)の(n, γ)反応のリテンションに及ぼす同位体効果が調べられた。

(7) 原子炉照射物質および生体関連物質の電気泳動法による分離機構の研究

原子炉照射した物質は核反応による反跳エネルギー、速中性子、 γ 線等の影響を受け、複雑な混合物となっている。未知化合物の混在する確率が高く、分離・同定が困難な場合が多い。昭和40(1965)年から昭和50(1975)年にかけて、電気泳動法における諸因子(支持溶液のpH、泳動物質のpKa値、泳動子の電荷・分子量・溶媒和の程度等)が泳動度に及ぼす影響の程度が検討されて、泳動度とそれらの因子を関係付ける一般式が導かれた。生体試料もまた、非常に多種類の化合物が、超微量から通常の化学量までにわたる存在量で混在しているような複雑な系である。昭和50年からは、そのような系から目的物質を電気泳動法で取り出すために、分離機構を解明し、また、分離の能力を改善する研究が進められている。支持体の改良、非水支持溶液の開

第26章 原子炉実験所

発、泳動子の溶存状態、錯体形成反応等についての詳しい情報から分離手段の改善、開発が試みられている。

(8) 高比放射能 RI 製造の研究

原子炉照射による高比放射能 RI 製造研究を目的とし、まず昭和41(1966)年から昭和44(1969)年にかけて、鉄をターゲットとする系について $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ 、 $^{54}\text{Fe}(n, \alpha)^{51}\text{Cr}$ 反応により高比放射能 Mn-54、Cr-51を製造するための基礎研究が行われた。Mn-54として 3 mCi/mg 程度の高比放射能のものを製造する方法が確立された。また、昭和43(1968)年から昭和44年には、電子直線加速器による $^{37}\text{Cl}(n, \alpha)^{33}\text{P}$ 反応によって高比放射能 P-33を製造する基礎研究が行われた。

(9) 短寿命核分裂生成物の放射化学的分離分析に関する研究

昭和45(1970)年以来、短寿命核分裂生成物の放射化学的研究が進められている。原子炉熱中性子による核燃料物質の核分裂で生じた半減期 1 時間以内の短寿命核分裂生成物を、各種クロマトグラフ法で迅速化学分離し、得られた分離試料からの放出 γ 線を Ge(Li) 半導体検出器で測定して、短寿命核種の半減期、 γ 線エネルギー、核分裂収率(独立収率および蓄積収率)などの決定が行われた。その一例として、昭和47(1972)年に Cs-141(半減期 24.9s)について、562KeV のほか 7 本の γ 線が確認され、その相対強度が求められている。昭和50年代後半に、検出器として電気伝導度計と NaI(Tl)(放射能検出器)とを装備した放射能イオンクロマトグラフシステムが開発された。それを用いて、原子炉照射した硝酸ウラニル(93%濃縮 U-235)水溶液中に存在する極微量無機イオンの化学形、イオンの存在状態およびその分布、ならびにそれらの放射化学的挙動についての研究が行われている。

(10) 水溶液における水素同位体効果の研究

重水は炉物理的には熱中性子標準場への利用、生物学的には放射化によるトリチウム生成、また中性子散乱実験においては重水素化法など、原子炉利用研究の種々の面に関わる。昭和50(1975)年以来、重水の化学的性質を軽水との比較において明らかにすることを目的とした、水溶液中における溶質-

溶媒相互作用の研究が進められている。重水素置換体の振動スペクトルが非置換体のスペクトルと異なる点を利用して、有機極性化合物の水和度や水和構造を調べ、水和現象に及ぼす水素同位体効果が化合物の化学形に著しく影響されることが示された。水素同位体効果が依存する因子の解明が進められている。

(1) 中性子捕捉療法のためのホウ素化合物の化学特性の研究

B-10は熱中性子に対する核反応断面積が大きく、また、核反応で生成する α およびリチウム粒子の飛程は短い。したがって、ガン細胞のみに集積するホウ素化合物を投与した後、患部を中性子照射すると、選択的にガン細胞のみを死滅させることができる。ガン細胞に集積しやすいホウ素化合物の開発がこの治療法の発展に通じる。これまで種々のホウ素化合物について研究されてきたが、より集積性の高い化合物の開発が望まれている。人体に投与された医薬品はpHがおよそ7.4の水系雰囲気下で化学的に挙動するので、創薬には溶液化学的知見も必要である。昭和62(1987)年から、含ホウ素アミノ酸を中心に、その化学特性、ことに水溶液中における化学的挙動が電気泳動法、赤外分光法、核磁気共鳴法等の手段で調べられている。

(2) アクチニド元素の化学と工学

核燃料物質であるウランやトリウム、およびそれらを原子炉で照射することにより生成される超ウラン元素は、核エネルギー利用に関わる極めて重要な元素である。アクチニド元素と総称されるこれらの元素群については、開所以来いくつかの基礎的な研究が行われてきた。例えば、昭和41(1966)年から昭和49(1974)年にかけて、フィッシュントラック法および α トラック法の基礎研究が進められ、KURの中性子束測定やアクチニド元素の検出が行われた。また、核物理・核化学の観点からは核分裂の機構に関する研究、炉物理・炉工学の観点からは中性子の核反応断面積に関する研究が現在に至るまで一貫して進められており、これらに関連してアクチニド元素の試料調製と分離分析のための化学的研究が行われてきた。アクチニド元素に関するこれらの基礎的な研究は、将来の核エネルギー利用のあり方にも関わるものと

して、近年ますます重要視される傾向にある。このため、これらの研究の新たな展開を図るための計画が進行中である。従来からの研究に加えて、アクチニド元素を用いるプロセス化学や環境動態などの研究も既に始められている。

第7項 放射性廃棄物処理・処分

(1) 放射性廃水の処理・処分の高度化に関する工学的研究

本実験所で発生する放射性廃水は、その放射性物質濃度や化学的、物理的性状が多様であり、放射性廃棄物処理部で処理される際にも多くの問題が生じる。このため、開所以来、その都度これらの問題の解決のための実験、研究が教官と技官の協力によりなされてきた。主要な研究としては昭和39(1964)年の設立当初には処理装置の特性試験が精力的に実施され、これと並行して蒸発濃縮処理に関する研究やフローテーション処理に関する研究が約10年間実施され、いずれもわが国におけるこの分野の研究の先駆的な役割を果たした。また、昭和45(1970)年からは凝集沈殿処理に関する研究が実施され、特に高塩分廃液中の放射能除去について貴重な知見が得られた。さらに、昭和56(1981)年には海水脱塩に用いられる逆浸透処理に着目し、放射性廃液の逆浸透処理に関する基礎的研究が実施され、多くの有用な知見が得られた。そして、これらの成果は、実際の廃水処理操作において大いに活用され、環境への放出放射能の低減化に寄与するとともに、貴重なノウハウとして蓄積されている。さらに、わが国におけるこの分野の研究の進展に大いに貢献していることはいうまでもない。近年は高度な管理を目的として、処理装置の性能の一層の向上と除染特性の追究、凝集沈殿スラッジ等の2次廃棄物の減容や安定化について現象論的および装置工学的な両面から研究が進められている。

(2) 放射性廃棄物の減容・固化処理に関する研究

放射性廃棄物処理業務に伴い発生する2次廃棄物や、処理が困難な放射性

廃水は長期保管に際して、含まれる放射性核種の飛散を防止するための、減容・固化処理が必要である。このため、昭和42(1967)年頃より、凝集沈殿処理により発生するスラッジの凍結再融解処理に関する実験が開始された。この研究により得られた成果は現在も稼働中の凍結再融解処理装置の運転に生かされている。その後、昭和45(1970)年頃には使用済みイオン交換樹脂等のセメント固化処理に関する研究が開始され、その結果、固化による増量を示す、容積係数の概念が提案され、この係数と固化体の圧縮強度を同時に評価する手法が開発された。また、昭和50(1975)年からは処理が困難なトリチウム水に注目し、これをセメントの水和反応を利用してセメント硬化体中に取り込み固定化するための基礎実験が行われ、セメント硬化体中に取り込まれたトリチウム水と周囲環境中の水との交換に関して重要な知見を得た。

(3) 気体状放射性廃棄物と環境放射能防除に関する研究

気体状放射性廃棄物問題として、昭和41(1966)年頃から核燃料濃縮に伴うオフガス処理の問題が手がけられ基礎的なデータが得られた。同時に、核燃料再処理に伴い発生する高レベル廃液の煅焼固化法の1つであるスプレー煅焼の研究が行われ、特にエアロゾル粒子の測定、発生確率の解明等で先駆的な役割が果たされたが、これらの問題の研究者が転出したため、昭和50年頃に研究は終了した。また昭和44(1969)年からは大気汚染と関連して、総量規制、環境容量的な研究が開始され、わが国の大気汚染問題に貴重な貢献をしたが、これについても担当の研究者が転出したため、昭和56(1981)年に研究は終了した。昭和51(1976)年からは、原子力施設に由来する環境中の人工放射性核種の測定により、これら核種環境中での分布、挙動、人体への影響等いわゆる環境放射能防除に関する研究が継続して行われており、環境放射能問題に関連して、貴重なデータを提供している。なお、最近、環境放射能防除の観点から、原子力施設の解体すなわちデコミッショニングの研究も開始された。

(4) 放射性核種の地中移動に関する研究

放射性廃棄物を地中に処分する場合、含まれる放射性核種の挙動は地下水

中の共存イオン等に大きく影響される。昭和42(1967)年からこの現象に関して多くの実験・研究が実施された。この結果、地下水中に主として含まれる、カルシウムイオン、マグネシウムイオンが保健物理上重要な Sr-90や Cs-137の挙動に与える影響が定量的に示され、この分野の研究に大きく貢献した。これらの知見を基に、昭和62(1987)年からは、放射能環境動態の立場から、放射性鉛と放射性ヨウ素の地中での挙動について研究が行われている。前者については放射性鉛の地表から地中への挙動を知ることにより、理論的に安定鉛の降下来歴を知る手法が提案され、実データによりその有用性が示された。後者については、放射性ヨウ素の化学的存在形態すなわちヨウ化物とヨウ素酸との形態の違いが土壌への収着についてどのような影響をもたらすかが実験的に研究され、かつ挙動モデルの提案がなされており、今後多くの進展が期待される。

(5) 原子力システムにおけるプロセスシステムズアプローチに関する研究

昭和53年より、資源循環再利用とエネルギーの有効利用の促進をそれぞれの目的とする科学研究費、環境科学特別研究(1)やエネルギー特別研究(1)等のプロジェクト研究の中で、近年の工学研究の特徴といえる価値の多様化や大規模化に着目した、多目的最適化問題の現実的な解法や大規模システムを対象とする数値計画手法の開発と応用研究が行われてきた。さらに現実に即した定式化やシステムの構造としての最適化を目指す観点から、混合整数計画問題の解法にも関わり、工業プロセスの生産計画、放射性廃棄物管理システムの運用計画および電源設備配分計画に関する問題解決において成果が示されている。また、平成3(1991)年よりは、原子力システムに代表されるような社会システムと関わりの大きい大規模システムにおいては、意思決定者間の価値観の相違に起因するコンフリクトの調整が重要との認識より、多目的下でのグループ意思決定支援に基づくリスク管理問題に着手して新しい知見が得られている。

第8項 保健物理・放射線防護

(1) 地水圏環境における人工放射性核種の移行に関する研究

原子力施設、放射性廃棄物処分施設などを含む核燃料サイクル施設から放出される、人工放射性核種による環境汚染を評価するための研究が昭和45(1970)年頃から行われてきた。評価対象は放射性核種が蓄積されやすい土壌、底質および浮遊物質(昭和55年以降)ならびに岩石(昭和60年以降)などであり、これらを含む環境中核種の移行モデルの構築および評価パラメータに関する理論的ならびに実験的研究が行われてきた。放射性核種の環境中移行は移流、拡散などの物理的因子、上記の地質材料と核種との化学的親和性さらに微生物などの生物的因子などにより影響されるが、とりわけ吸着・脱離、溶解・沈殿、核種の溶液中存在形態など化学的因子の影響が大きい。このような複数反応・移行現象の主として室内実験設備による再現と観測、その影響因子の究明、多段階移行機構の解明とモデル構築などの手順により、種々の地水圏環境における挙動予測の高精度化が指向されている。

(2) 放出源近傍環境における放射能とインパクト評価に関する研究

研究炉の関連施設で発生する放射性気体および液体中核種(例えば Ar-41、トリチウム、Na-24、Co-60など)の分布や濃度変動、モニタリング法さらに被曝線量としてのインパクト評価などに関する研究が ALARA(as low as reasonably achievable)思想のもとで実環境において行われてきた。昭和55(1980)年以降、平常時の被曝線量として最もインパクトの大きい Ar-41 について放出経路ごとの動態解明することにより環境への放出低減研究が行われてきた。炉心近傍の重水設備で生成される酸化トリチウムをトレーサとして、炉室空気中の濃度分布、室内水槽水やコンクリート建材への移行・挙動とそのモデル化、空気中低濃度トリチウムのモニタリング法の開発などに関する研究が昭和63(1988)年以降に行われた。また、所内排水経路の希釈・混合・拡散に関するトリチウムの環境動態も明らかにされている。平成2

(1990)年以降には1次冷却水に関して、炉の起動・停止に伴う短・中寿命核種の生成率評価と濃度変化、そのイオン交換樹脂浄化系による核種蓄積・外部線量率分布と樹脂層内挙動の解明、これら平常時の挙動モデル構築による燃料破損検出器モニタ指示値の保健物理的意味付けと異常時の早期における燃料破損予測の可能性などに関する放射線管理的研究が行われている。

(3) 地中における天然元素の分布と挙動に関する研究

天然に賦存する元素の分布や挙動に関する研究が行われてきた。昭和50(1975)年頃から野外環境での主な被曝源となるウラン系列の娘核種を含む特にラドンに着目し、その地下水、Soil Gas および土壌を対象として環境動態研究が推進されてきた。地下水および Soil Gas 中のラドン濃度は、昭和50年代以降、トルエントラップー液体シンチレーション法を用いて西日本を中心に測定が継続され、被曝線量評価の観点から諸外国の値と比較されている。実験所内では昭和55(1980)年以降、ラドンの地中(地下水および Soil Gas)濃度鉛直分布、循環法による連続モニタリング法の開発さらに環境因子に伴う濃度変動や地上への拡散機構などに関する研究が行われてきた。地表近傍土壌は沈降・再浮遊、降雨浸透、温度、酸化・還元など環境変化の著しい領域であり、各種元素の溶脱・移行が継続している。そこで平成4(1992)年以降、土壌中主成分元素や微量元素の分布・動態に関する研究が分析法の比較を含めて重金属など放射性物質以外の人工汚染物質挙動のアナロジ的研究手法として推進されている。

(4) 放射性物質の体内動態に関する研究

核燃料サイクルや核融合炉の安全性を確保し、化石燃料に代わる次世代のエネルギー源として原子力利用を推進するためには、原子力施設から発生する放射性物質の環境および人体中での動態の解明を行い、ヒトへの被曝線量を予測するための信頼できるモデルを構築し、これを用いて生物影響の程度を評価することが前提条件である。そのために、トリチウムなどの原子炉施設に由来する人工放射性物質の体内動態と内部被曝線量評価に関する研究が、昭和56(1981)年以来、マウスをモデル動物として行われてきた。この研

究により、放射能体内動態のコンパートメントモデル作成のための一般化された技法が確立された。また、有機結合型トリチウムの被曝線量評価における重要性が検証され、飲食物中トリチウム摂取によるヒトでの被曝線量評価のモデルとして応用性の高い3コンパートメントモデルが作られた。さらに、線量評価の面からは、細胞核でのマイクロドジメトリが行われた。

(5) 自然環境中の γ 線エネルギー分布の評価に関する研究

原子力施設周辺環境における管理目標値が5 mrem/yと設定され、できるだけ被曝線量を低く抑えることが環境放射線モニタリング指針で示された。昭和51(1976)年以来5 mrem/yを確認する方法として γ 線に感度の高いNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータが使用され、応答関数法による方法が開発され、施設寄与放射線の分離評価法が検討されてきた。この方法を本実験所野外環境に適用することにより放射性アルゴンの放出と被曝線量に寄与する気象条件との関連が明らかにされた。また中国核実験に伴う空間放射線量の変化も分離評価することが可能になった。この方法は γ 線エネルギー分布の測定に基づくため、実効線量当量などのリスク表現のための線量評価を可能にした。

(6) 屋内外環境中のラドン・トロンおよびそれらの娘核種の性状と挙動に関する研究

原子力施設内作業者の放射線被曝の要因となるとともに、空气中放射能モニタリングにおけるバックグラウンドとして障害となるラドン・トロンとそれらの娘核種の影響評価のため、昭和53(1978)年以来、測定法および測定精度の検討を踏まえて、換気方式の異なる建屋内および屋外環境におけるそれらの性状と挙動について、調べられてきた。それらを通して建屋内の濃度の時間変動の実態が把握されるとともに、その変動の様子が簡単なモデリングにより説明できることが示された。また、ラドン・トロン娘核種の性状や挙動が、主に換気条件やエアロゾルによって影響されることが示され、それらの定量的関係が明らかにされた。さらに、ラドン・トロン濃度のみならず、娘核種のフリー成分比、平衡係数および粒径分布等に関する理論的・実験的検

討が加えられ、それらのパラメータが被曝線量に与える影響に関する基礎的データが蓄積されてきた。

(7) 原子力施設における微弱中性子線量評価に関する研究

原子力施設の放射線安全に不可欠な情報の1つである中性子線量の評価のために昭和58(1983)年以来高感度・線量当量直読式中性子検出器の開発が試みられてきた。これまで中性子線量は健康影響の相対的重要性にもかかわらず検出器の感度不足のため限られた範囲で得られるのみであったが、本線量率計の開発によりバックグラウンドレベルからの中性子線量当量率の評価が可能になった。本線量率計は原子炉室作業環境の連続監視モニタとして応用されたほか、施設外中性子伝播特性の評価に利用され、周辺環境に与える影響について中性子線量の重要性を明らかにすることができた。また中性子線量の測定精度の改善を目的として作業環境における中性子スペクトル評価法の開発に取り組み、反跳陽子比例計数管を使用することにより臨界集合体装置室などのように数百 keV 以上のエネルギーを有する場での中性子エネルギー分布の評価を可能にした。固体飛跡検出器による中性子線量の測定や、この技術を応用した核分裂性あるいは(n, α)反応核種の定量分析の研究も昭和45(1970)年から昭和57(1982)年まで遂行された。

第9項 生命科学・医学

(1) 染色体に対する放射線作用の研究

細胞の遺伝情報を担う DNA・タンパク質複合体としての染色体に、放射線によって誘発された初期損傷が、いかにして染色体異常として発現されるかの研究が、昭和45(1970)年頃から本格的に始められた。特に、DNA にプロモデオキシウラシルを取り込ませた姉妹染色体を染め分ける技術を導入することによって、姉妹染色体交換が低線量の放射線で誘発されることが見出された。昭和50(1975)年頃から、染色体の構造と機能に対する放射線損傷の研究に取り組み、昭和55(1980)年には核融合炉研究との関連でトリチウムの

生物作用、特に、その RBE(生物学的効果比)を決める研究が開始された。このような研究の中で、極低線量の放射線の生物作用が、高線量からの外挿では推定され得ない影響があることが、培養細胞でも確認された。この現象を「放射線適応応答」と称し、遺伝子発現制御のための遺伝子ネットワークの解明に関する研究が進められた。

(2) 細胞の放射線損傷とその修復機構の研究

放射線は細胞に種々の損傷を与えるが、細胞はこれらの損傷を修復できる。なかでも放射線耐性菌は、非常に効率よい修復機構により高線量のあらゆる放射線に抵抗性を示す。昭和58(1983)年から昭和60(1985)年に、大腸菌では低 LET(線エネルギー付与)の γ 線による短鎖切断は修復されるが、原子炉熱中性子を利用した高 LET の BNCB(ホウ素・中性子捕獲ビーム)による DNA 損傷は分子切断と再結合の過程を経た修復としては検出され難いことが明らかになった。昭和61(1986)年以降は修復能の優れた放射線耐性菌を用いて、DNA の短鎖切断および細胞の致死を起こす二重鎖切断の再結合、形質転換活性の回復等が起こることが明らかになった。またこれら修復の進行は高 LET 放射線損傷では低 LET 放射線より遅いことが示された。しかし修復の分子機構についてはほとんど解明されていないので、放射線により主要標的分子の DNA に生じた二重鎖切断等の損傷が、細胞内に既存の諸酵素または損傷により誘導される酵素群の諸機能により、どのような過程を経て修復されるか、さらにこれらの関連酵素の遺伝子の分離同定を目指して研究が行われている。

(3) 細胞および生体分子に対する熱中性子作用機構に関する研究

熱中性子は被照射系を構成する原子と容易に核反応を起こし、そこから生じた各種の事象(反跳核、即発粒子、核変換効果)を通して生体に影響を及ぼす。細胞や核酸、タンパク質等の生体関連物質を対象として、これらの核反応がどのように作用するかを究明する研究が昭和47(1972)年から継続して行われている。

(4) 原子炉による中性子捕捉療法の医学生物学基礎研究

第26章 原子炉実験所

本実験所における中性子捕捉療法の医学生物学基礎研究は、昭和45(1970)年共同利用研究として細胞やハムスター等の小動物を用いたメラノーマに対する基礎研究から始まった。昭和48(1973)年からは犬等を用いた前臨床実験も進められてきた。昭和49(1974)年本実験所における第1例の脳腫瘍への試験治療の後は、本療法に関する物理工学の基礎研究と共同歩調をとり基礎研究を中心に進められてきた。昭和51(1976)年原子炉医療基礎研究施設が設置され本格的な共同研究体制が整備された。昭和54(1979)年低混在 γ 線熱中性子照射場を用いてホウ素による熱中性子照射効果の増感作用機構が医学生物学的に確認された。昭和57(1982)年以降、即発 γ 線測定法により生体内のB-10濃度を非観血的に測定し、ホウ素化合物の投与方法を含めた最適化研究が進められてきた。これらの成果を基礎に平成2(1990)年2月から試験治療が再開され、平成6(1994)年6月現在46例を数えている。平成5(1993)年6月以降細胞の致死効果と治癒確率の関係から定められた新治療照射基準により、治療結果の大幅な改善が見られ、本療法の新たな展開が期待されている。なお、これらの研究成果は日本癌学会、日本医学放射線学会、日本皮膚科学会、日本脳神経外科学会、中性子捕捉療法国際会議等に発表されてきている。

(5) 原子炉中性子捕捉療法に関する医学物理工学の基礎研究

昭和43(1968)年以降、悪性腫瘍に対する中性子捕捉療法の分野は日本が世界をリードしているが、その試験治療は今日200件以上に達している。本実験所では昭和44(1969)年から本療法に関する物理工学の基礎研究が開始され、中性子の医学生物学照射に関する基礎研究に貢献してきた。主な成果は、昭和45(1970)年熱中性子と γ 線の分離測定法確立、昭和48(1973)年低混在 γ 線熱中性子照射場、昭和49(1974)年低2次 γ 線発生熱中性子遮蔽材、昭和54(1979)年医学生物学照射用照射装置、昭和55(1980)年細胞レベル吸収線量評価法確立、昭和57(1982)年即発 γ 線による ^{10}B 濃度測定法の開発実用化、昭和61(1986)年(γ, n)反応を含む中性子輸送計算コードの改良、平成3(1991)年生体内熱中性子線量分布特性評価等である。平成4(1992)年以降は

熱外中性子やハイパー熱中性子照射場の設計検討等に取り組んでいる。これらの成果は、昭和51(1976)年武蔵工業大学研究炉の医療照射場改造、平成2(1990)年日本原子力研究所研究炉 JRR-2 医療照射場改造、ならびに KUR の治療照射利用に対応する治療照射設備の整備、また計画中の重水熱中性子設備の改造等に生かされている。なお、研究成果は日本原子力学会、日本医学放射線物理学会、また昭和58(1983)年以降2年ごとに開催される中性子捕捉療法国際会議等に発表されてきている。

(6) 核生物学的手法を用いた生命の起源・化学進化の研究

生命体が発生する以前の原始地球上においては、化学進化と呼ばれる生命の発生を準備する過程が進行し、種々の生体関連物質が合成され、複雑化し、濃縮されていったと考えられる。熱中性子の捕獲反応や β 壊変に伴って放出される反跳原子核は、それを取り巻く物理的・化学的条件に応じて様々な化学変化を起こすことが知られている。この種の反応が原始地球上において可能であったとの想定の下に、昭和47(1972)年以来、原子炉を利用して各種反跳核を生成させて、化学進化の模擬実験が行われてきた。また、 β 壊変等の弱い相互作用ではバリティが保存されないことに着目して、昭和54(1979)年から平成2(1990)年にかけて、その現象と生体分子の光学活性の起源との関連を調べる実験が行われた。一連の実験研究によって、 β 壊変によってもたらされる偏極電子と、D,L-光学異性分子の持つ鏡対称な電子構造との間に生起するなんらかの相互作用における違いが生体分子の光学活性の起源に関連することが証明された。昭和59(1984)年から、 γ 線照射したアミノ酸混合水溶液における特定アミノ酸の選択的分解の研究が進められている。

(7) 核生物学的手法によるガン診断物質や制ガン剤の開発研究

制ガン作用を持つ種々の有機金属化合物の金属部位に比放射能の高い短寿命の RI を組み込ませ、これら薬物が本来持つ腫瘍親和性を利用して、RI を腫瘍に集中させて、診断に応用する実験が行われている。また、これらの薬物が持つ制ガン作用に加えて、RI の壊変によって、一層、制ガン作用を

高めることが期待できる。具体的には、原子炉で製造可能な RI である Cu-64、Zn-69m、Pt-197等を用いて、ブレオマイシン複合体(昭和51~54年)やシスプラチナム(昭和61年~)等を合成して、その制ガン効果の増強が調べられている。一方、 γ 線放射体である Pt-195mを用いて各種の制ガン性白金錯体を合成し、これらをトレーサとして利用することによって白金制ガン剤の作用機構を明らかにするための研究も行われている。すなわち Pt-195mを利用するならば検出感度が通常の機器分析の1,000倍以上もあがるため、処理された培養細胞内の DNA と結合した白金分子数を求めることが可能になる。平均致死濃度で処理された細胞内の各種分子に結合する白金分子数は平均致死数を与えるものであり、白金の致死効率や標的分子の決定に重要な情報をもたらす。この手法を用いて、各種白金錯体の制ガン作用機構が明らかにされるとともに、薬剤-温熱間や薬剤-放射線間の相互作用機構が明らかにされた。

(8) 核および核外遺伝情報系の相互作用

核外のオルガネラ(細胞内小器官)としての葉緑体から DNA が単離され、核 DNA とは異なる DNA 分子種の存在することがクラミドモナスの細胞系で初めて証明された。さらにその他の高等植物、藻類等の葉緑体にも特異的な DNA の存在することが確認された。またオルガネラの1つであるミトコンドリアにも同様な DNA の存在が明らかにされた。したがって真核生物の核および DNA を含む各種のオルガネラは、それぞれ固有の遺伝系を保持し、核あるいは核外遺伝情報系のネットワークを構成し、それらの系の相互作用の進行によってオルガネラおよび細胞全体の形質発現が完了するものと考えられた(昭和40~平成2年)。したがって核外遺伝情報系の代表的なオルガネラとして葉緑体を取り上げ、各遺伝情報系の協調作用に関する解析が行われた。暗培養細胞のグリーニング過程の解析から、核遺伝子および葉緑体遺伝子支配形質としてチラコイド膜タンパク質およびそれらの合成系の存在が確認された。したがって、葉緑体形成過程は、両遺伝情報系の制御下で進行することが明確になった。また葉緑体 DNA の分子性状と系統発生的な位

置関係の間に密接な相互関係の存在することが指摘された。それらのオルガネラ DNA の起源および進化に関する種々な知見に基づいて、特に葉緑体の起源について重要な考察が呈示された(昭和40～平成4年)。

第10項 環境科学・放射線応用

(1) 生体組織含有微量元素の挙動に関する研究

中性子放射化分析法を用いて、ヒト組織特に毛髪中に含まれる微量元素の定量を行い、人体内の微量元素の挙動に関する研究が昭和51(1976)年から開始された。まず日本人の毛髪中に含まれる元素濃度の平均値を性別、パーマメント有無別に、年齢とともにどのように変化するかを調べた。さらに毛髪中の元素濃度が、環境条件によってどのような影響を受けるかを調べるために、重金属汚染地域に指定されている、水俣(水銀)、土呂久(ヒ素)および神通川流域(カドミウム)住民の毛髪の実行分析を行い、日本人の平均値との比較が行われた。平成5(1993)年からは、同じく中性子放射化分析法により、象牙中の元素濃度の定量を行い、それらの解析から象牙の産地分析を行う研究が開始された。現在のところ、中央アフリカ諸国産の象牙は、ほぼ区別できることが分かっている。

(2) 年輪年代と年輪気候に関する基礎研究

考古遺物の年代を明らかにするという目的で、昭和56(1981)年から年代年輪法の研究が始められた。年代決定には、C-14法をはじめとしていくつかの方法があり、特に、年輪年代法は毎年生成する年輪の生成年代を同定することにより、原理的には年代誤差を持たない、最も精度の高い年代が決定できる方法である。年輪年代法を日本に適用するため、基礎的指標を見出すことに努めてきた。西日本に生育するヒノキ、スギ、マツ現生木を利用し、東は長野県王滝村から西は山口県徳山市までの29地点の測定が行われた。29地点の年輪幅変動相以地図から、王滝村と徳山市が共通変動を示すことも明らかに、日本における適用地域は東西に幅を持つという知見が得られた。

平成3(1991)年からは、本研究の拠点を北海道大学に移し、年代決定に利用するための古木材、古建築材の収集と解析が行われている。

(3) 石器および玉類など古文化財の原材産地分析

考古遺物の産地の決定は、古代における交通、交易ひいては文化圏の広がりとその変遷を見るために重要である。遺物の中には国宝、重要文化財も含まれ、非破壊分析が重要で、石器では昭和43(1968)年からサヌカイトと黒曜石の石材を使用した遺物について、また勾玉、管玉など玉類の石材はヒスイ、碧玉について昭和62(1987)年から、それぞれ本格的に研究が行われ、原産地を決定する方法が開発された。現在、遺跡出土の石器遺物約1万5,000個の石材、玉類等数千個の石材について原産地が決定された。石器、玉類など考古遺物は蛍光X線分析による元素の同定、および電子スピン共鳴法によりイオンおよび色中心などが分析される。一方、各原産地から採集された原石についても同様の分析が行われ、この両者を多変量統計の手法である、マハラノビスの距離を求めて行うホテリングの検定から遺物の原石産地が同定される。

(4) 中性子ラジオグラフィに関する研究

中性子ラジオグラフィの研究は、昭和49(1974)年頃よりE-2実験孔を利用して開始された。E-2実験孔は、先端が重水タンクに向いており、良質の熱中性子ビームが得られ、標準的な優れた性能を持つ設備として利用されている。昭和53～54(1978～79)年度の科学研究費によりリアルタイム中性子ラジオグラフィ装置が開発され、昭和55(1980)年にわが国で最初に中性子テレビジョン装置による画像の本格的な撮影に成功した。この装置を用いて標準試料による解像度の測定、MTR型原子炉燃料側板の可燃性毒物ボロンの位置測定、水中の物体の動態観測やCT(中性子断層撮影)などに応用されて、実用上十分に満足できる結果が得られた。さらに、この装置を利用して気液二相流の研究、噴流層内の粒子運動の可視化と計測などの応用研究が開始されている。平成元(1989)年より黒鉛熱中性子設備に冷中性子設備が設置され、冷中性子ラジオグラフィの研究も開始されている。この間、8回の短期

研究会や専門研究会と平成元年に第3回国際会議を大阪で開催した。この設備は日本全国の大学、研究所の共同利用に供されており、多くの研究者、学生や外国人研究者が利用している。

(5) 原子力大気環境・気象の研究

原子力施設の環境保全に対する気象学の貢献として、KURが立地する大阪府南部とその周辺において、昭和44(1969)年頃より気象気球による大気境界層の構造の観測、昭和50(1975)年頃より地上風系の統計解析、さらに昭和62(1987)年頃より海陸風数値モデルの構築など種々の研究が遂行されてきた。蓄積された知見は、KURの大気環境保全のため必須のものであるとともに、局地気象学、特に海陸風の研究の進展に貢献するものとなっている。また、日本原子力研究所との共同による関東地方の海陸風の観測(昭和46～47年)の成果はわが国の代表的なものとされた。さらに、AMTEX(気団変質観測計画、昭和50年)、MONEX(モンスーン実験計画、昭和54年)などの国際共同観測計画にも参加し中緯度および赤道海域の大気境界層の構造に関する成果を収めた。昭和46(1971)年にはレーザ技術を活用した気象用ライダーが開発され、先駆的役割を果たした。また、大気中の汚染物質濃度が非正規型時系列をなすことに注目し、その統計的性質を拡散理論との関連で解明し、これに曝露された人口集団の有病率の検出と評価、予測のモデルを構築する研究も昭和44(1969)年より昭和56(1981)年まで遂行された。

第 3 節 研究部門等の改組

平成 7 (1995) 年 4 月 1 日に、本実験所では、かねてより計画されていた研究部門等の改組が 6 研究(大)部門(20 研究分野で構成)、2 附属施設(2 研究分野で構成)という形で実施された。これは KUR の整備充実に柱として新たに研究組織を再編し、所長前田豊(平成 7 年 4 月 2 日就任)の下にさらなる研究活動の活性化を目指したものである。以下にこれらの研究部門等の概要を示す。

(1) 原子炉安全管理研究部門

原子炉施設の安全性向上のためにあるいは実験所の擁する研究炉等の安全で円滑な運転のために必要な諸課題——原子炉自身の安全から、バックエンドの放射性廃棄物管理や放射線管理などの課題——をシステム工学的に研究することを目的とし、研究炉管理、核物質管理、放射性廃棄物管理、放射線管理、同位体製造管理の 5 つの研究分野から構成されている。

(2) 中性子科学研究部門

中性子の基本特性を利用した磁性体等の物性研究、中性子の量子工学的精密制御機器の開発、中性子光学や極低温技術を応用した超冷中性子源の開発およびそれらを用いた基礎物理の研究を行い新研究領域の発展に資することを目的とし、中性子物性、冷中性子理工学、中性子制御の 3 研究分野から構成されている。

(3) 核エネルギー基礎研究部門

21 世紀のエネルギー源として必要不可欠な核エネルギーの開発・有効利用を目的として、核・熱・材料の各分野の有機的な連携の下に実験的・理論的研究を行うとともに、原子力基礎研究の分野での多様なニーズに応えるた

め、次期線源開発を目指している。核変換システム、極限熱輸送、材料照射効果、量子ビームシステム(客員)の4研究分野から構成されている。

(4) バックエンド工学研究部門

核エネルギーの長期利用に不可欠な核燃料サイクルのバックエンド技術の確立に資することを目的として、核燃料のリサイクル、超ウラン元素の管理に関する化学的研究および放射性廃棄物処分等に関する環境安全研究を行う。

放射能環境動態、核プロセス化学の2研究分野から構成されている。

(5) 応用原子核科学研究部門

原子炉で生成される短寿命 RI やライナック電子線等を高度利用し、独創的な新しい手法を駆使して原子核をプローブとする物質の基本性質の解明やそれらの有用な応用に関する研究を幅広く行うことを目的とし、放射線計測、原子核物性、粒子線物性の3研究分野から構成されている。

(6) 放射線生命科学研究部門

原子炉中性子をはじめとする粒子線・放射線を利用し、生命現象の解明と高度医療を目的とした生物・医学研究を行う。粒子線生物学、同位体利用、放射線医学物理の3研究分野から構成されている。

(7) 附属原子炉応用センター

研究炉およびその関連実験装置のより安全な運転と利用の一層の高度化に向けて必要となる基礎的な諸課題に関して、特に実験所で取り組む大学院教育や研究成果の社会への還元活動に関連させつつ研究することを目的とし、原子炉応用研究分野が設けられている。

(8) 附属原子炉医療基礎研究施設

原子炉中性子を利用した悪性腫瘍に対する治療効果の飛躍を目指し、原子炉熱中性子および放射線一般を用いた癌の治療と診断のための基礎的研究を行うことを目的とし、粒子線腫瘍学研究分野が設けられている。